ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION DU Dr TOULOUSE

BIBLIOTHÈQUE
D'ASTRONOMIE ET DE PHYSIQUE CÉLESTE

DIRECTEUR
J. MASCART

Les Observations Méridiennes

Tome Premier

Instruments & Méthodes d'Observation

PAR

F. BOQUET

OCTAVE DOIN & FILS. EDITEURS. PARIS

M. TER QUEM
BOOKSELLER

Octave DOIN et Fils, éditeurs, 8, place de l'Odéon, Paris.

ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE

Publiée sous la direction du Dr TOULOUSE

BIBLIOTHÈQUE

D'ASTRONOMIE ET PHYSIQUE CÉLESTE

Directeur : **J. MASCART**

Astronome à l'Observatoire de Paris.

L'astronomie est, assurément, la plus troublante des sciences, celle qui sut mettre en jeu, depuis la plus haute antiquité, les réflexes humains les plus mystérieux, l'angoisse de l'indéfini, et l'angoisse du temps. Si les phénomènes extérieurs n'avaient pas imposé à l'esprit la nécessité d'un milieu, d'un espace, dont ils sont en même temps et la condition et la conséquence; si, par là, ces phénomènes ne s'étaient pas montrés réciproquement dépendants, le monde n'eût été pour l'homme qu'un état de réalité apparente, et sans répercussion possible sur l'individu.

Mais il en est autrement : les manifestations célestes, ou atmosphériques, sont trop absolues, trop douloureuses, pour ne pas imposer une nécessité objective, matérielle. Et l'homme eut recours à l'étude des faits — dans le but non dissimulé de les prévoir.

Il s'agissait donc, tout d'abord, de fixer les positions des objets et d'en étudier les variations possibles; de préciser, dans le temps, la situation des singularités célestes pour en

prédire le retour : et, à cet égard, la persévérance et l'habileté des anciens restent, à l'heure actuelle, des objets dignes d'admiration. L'astronomie de position, depuis la plus haute antiquité, fut l'objet unique et assez vaste de la curiosité : ses développements incessants, sauf en ce qui concerne un moyen âge ténébreux, imposent à Képler une nouvelle conception mécanique et font, à la fin du XIX^e^ siècle, un véritable monument d'observations patientes et précises.

A côté de la voie principale, quels ne sont pas les sentiers où il fallut s'engager!

L'exécution des calculs numériques tint bientôt une place prépondérante et nécessita les travaux les plus délicats pour être rendue aussi simple, aussi aisée, aussi rapide que possible; l'étude des erreurs, systématiques ou accidentelles, vint dominer l'approximation pour soumettre les méthodes aux procédés d'observation. Ainsi, sans aucun doute, fut créée une science à part, véritable prolongement des mathématiques pures, science du calcul proprement dit : ses principes sont de la plus haute utilité pour tous ceux qui, dans un ordre d'application quelconque, ont à exécuter sur des nombres des opérations plus ou moins compliquées, et les variantes du calcul graphique ou du calcul mécanique sont loin d'avoir donné toute leur mesure.

La mécanique de Newton allait poser à l'analyse pure une des énigmes les plus redoutables de la mathématique, à l'heure même où les physiciens et les artistes devaient rivaliser d'ingéniosité et de talent pour aboutir aux puissantes ressources de l'optique moderne.

Et il ne faudrait pas croire que la géométrie pure, elle-même, soit restée en dehors de cette influence : arpentage dès l'origine, elle tend à la mesure des objets terrestres et de leurs formes, et, sous la pression de l'astronomie, elle engendre bientôt la topographie, la géodésie, avec tout leur appareil de mesures délicates et de calculs très précis

Est-il besoin de se demander ce que deviendrait le navigateur privé des ressources de l'astronomie? Faut-il s'appesantir sur la répercussion de cette science en ce qui concerne la cartographie, la métrologie, la géométrie perspective ou la métrophotographie, la météorologie ou la sismologie?

Il y a plus encore : la chimie, jusqu'alors écartée, va être interrogée dans son mécanisme le plus intime et le plus profond, et par l'analyse spectrale, et par la photographie. Ce sont les plus profondes transformations, et elles datent d'hier. Non content de l'aspect et des trajectoires des astres, l'astronome veut en sonder la structure, le mécanisme — et l'avenir — par l'analyse spectrale; insatiable dans son besoin de précision, il veut photographier le ciel, le fixer, le figer sur une plaque. Mais, alors, la nature se refuse, la matière se révolte ; l'instrument se cabre devant la précision qu'on lui demande et mille problèmes nouveaux surgissent pour éviter les plus petites erreurs, pour en trouver l'origine et le remède; le microscope est buté devant le grain de la gélatine, devant la vie même et la transformation du colloïde.

N'est-ce pas là un domaine immense? et qui peut songer à l'embrasser?

Si le développement de l'astronomie est un des plus singuliers, des plus importants et des plus étendus dans la science moderne, les progrès réalisés ont souvent conduit à des révolutions complètes dans les procédés d'observation et de mesure, dans la direction et l'interprétation des expériences; au cours de ces transformations, il y a lutte incessante entre les vieilles et les nouvelles méthodes, les procédés les plus classiques se transforment, les nouvelles recherches apprennent à utiliser au mieux les données empruntées à des sciences lointaines.

C'est pourquoi l'astronome est conduit, malgré lui, à se spécialiser, impérieuse nécessité qui, à côté de quelques avantages, présente de graves inconvénients. Tout d'abord

il abandonne bien des sujets obscurs, sous prétexte qu'ils ne nécessitent pas les puissants instruments modernes; ici, l'amateur éclairé peut apporter un concours précieux, je dirai même indispensable en bien des questions où il faut encore accumuler des observations systématiques. Il n'y a, en effet, aucun fossé, aucune discontinuité entre l'amateur et le professionnel : d'un terme à l'autre de la série, ce doivent être les mêmes principes scientifiques, la même rigueur et la même probité, les mêmes instruments, les mêmes méthodes.

A ignorer entièrement les autres sentiers, chacun risque de peu connaître, de mal comprendre et de mal interpréter sa propre spécialité, de passer à côté du lien qui peut transformer un petit fait scientifique en une découverte utile et féconde; à manquer d'érudition, on ne songe pas assez que, tout à coup, le perfectionnement d'un détail peut ramener au premier plan une expérience qui était presque tombée dans l'oubli. Il est souvent utile de bien se souvenir pour bien prévoir.

Puis, de plus en plus, il faut gagner du temps : entre tous les procédés connus, entre tous les instruments si variés, parmi les méthodes si diverses d'observation, de calcul et de réduction, comment choisir le processus le plus sûr, le plus simple et le plus rapide, le mieux approprié au but poursuivi? Comment avoir une vue d'ensemble immédiate sur l'enchaînement naturel et logique des divers phénomènes, pour comprendre le développement des idées, la genèse des hypothèses, leurs défauts, leurs qualités et leurs nécessités?

Il est grand temps, aujourd'hui, de décrire l'état des procédés utilisés dans les différentes branches, de les soumettre à une critique sévère, de les mettre au point avec leurs avantages et leurs inconvénients.

L'Encyclopédie s'impose.

En effet, nul ne peut plus songer à écrire un traité d'en-

semble : dans un ouvrage volumineux, aussi bien, chacun dégagerait difficilement la spécialité qui l'occupe. D'autre part, il ne fallait pas découper l'astronomie en sujets trop restreints : si chacun veut aller au plus pressé pour se familiariser avec les méthodes spéciales, avec les procédés très particuliers, il faut se garder de perdre de vue un ensemble assez étendu, car, dégagées de tout cadre, les recherches risqueraient d'apparaître comme des petites pièces détachées, sans lien, insuffisantes pour construire un véritable monument scientifique.

C'est à des desiderata aussi complexes que va s'efforcer de répondre cette Encyclopédie.

Par sa partie générale, elle s'adresse à tous les savants non spécialisés dans les études astronomiques, mais désireux d'en connaître l'histoire et l'évolution, les méthodes et les résultats; aux amateurs, à tous ceux qui étudient une branche connexe de la science, elle servira de guide pour indiquer tous les écueils sur les routes déjà parcourues, aux maîtres de l'enseignement, elle sera d'un secours indispensable, épargnant la perte de temps et les recherches pénibles sur lesquelles doit s'appuyer la synthèse, leur évitant de quitter le contact avec les progrès constants et les plus récents qui sont répartis en de lointaines publications; aux élèves, elle fournit un enseignement écrit précieux, une initiation aux méthodes expérimentales et aux discussions fécondes de la science moderne.

Les professionnels auront tout à gagner à suivre une telle publication : par suite de la pénétration réciproque et nécessaire des sujets, certaines questions sont appelées à être envisagées dans des volumes distincts, sous des points de vue d'autant plus fructueux qu'ils seront plus différents; et, tout en élargissant ainsi le champ de leur action, les astronomes se réjouiront de trouver, sur chaque objet, une bibliographie complète et précise qui leur évitera bien des ennuis.

Tel est le plan : il restait à le réaliser.

Ici, les difficultés ne font point défaut, et l'exposé de ce que nous avons voulu faire nous sera une excuse pour les inévitables imperfections. En premier lieu, il fallait imaginer une subdivision un peu arbitraire : elle a été faite pour le mieux, de sorte que chaque volume renferme un ensemble assez étendu ; peut-être telle question, *à la mode* aujourd'hui, paraîtra-t-elle sacrifiée vis-à-vis de telle autre dont l'intérêt nous *semble* épuisé, mais on voudra bien convenir, en revanche, que le passé même des vieux problèmes porte en lui son enseignement et mérite une étude critique. En second lieu, tous les livres de cette classification ne présentent pas le même caractère d'urgence : en tenant compte des autres publications, des ouvrages récents, nous avons cru préférable de différer, pour l'instant, quelques-uns de ces volumes, qui viendront plus utilement à un autre moment.

Au milieu d'intérêts si divers et d'une satisfaction malaisée, nous avons adopté le plan ci-joint, soutenus uniquement par l'espoir de collaborer à une œuvre logique et utile.

Les volumes seront publiés dans le format in-18 jésus cartonné ; ils formeront chacun 350 pages environ avec ou sans figures dans le texte. Le prix marqué de chacun d'eux, quel que soit le nombre de pages, est fixé à 5 francs. Chaque volume se vendra séparément.

Voir, à la fin du volume, la notice sur l'ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE, pour les conditions générales de publication.

TABLE DES VOLUMES

ET LISTE DES COLLABORATEURS

*Les volumes publiés sont indiqués par un *.*

1. **L'Astronomie :** Vulgarisation générale.
2. **Histoire de l'Astronomie.**
3. **Histoire et rôle des observations astronomiques,** par J. Chatelu, Astronome à l'Observatoire de Paris.
4. **Astronomie sphérique.**
5. **Astronomie de position.**
*6. **Observations méridiennes,** 2 volumes, par F. Boquet, Astronome titulaire à l'Observatoire de Paris.
7. **Observations extra-méridiennes.**
8. **Optique astronomique.**
9. **Calcul des Orbites et Ephémérides,** par Luc Picart, Directeur de l'Observatoire de Bordeaux.
10. **La Mécanique céleste.**
11. **Calcul des perturbations.**
12. **Théorie de la Lune et des Satellites.**
13. **Attraction universelle.**
14. **La Terre.**
15. **Le Soleil.**
16. **Les Théories du Soleil,** par J. Bosler, Astronome à l'Observatoire de Meudon.
17. **La Lune et les Marées.**
18. **Les Eclipses.**
19. **Mesure du temps.**
20. **Les Etoiles simples.**

21. **Etoiles multiples, amas et nébuleuses.**

22. **Les grosses planètes.**

23. **Petites planètes, bolides et étoiles filantes.**

24. **Les Comètes,** par M. Esclangon, Professeur à la Faculté des Sciences de Bordeaux.

25. **Phénomènes singuliers en astronomie.**

26. **Les Constantes astronomiques.**

*27. **Spectroscopie astronomique,** par P. Salet, Astronome à l'Observatoire de Paris.

28. **Photographie astronomique,** par E. Touchet.

29. **La Cosmogonie.**

ENCYCLOPÉDIE SCIENTIFIQUE

PUBLIÉE SOUS LA DIRECTION

du Dr **TOULOUSE**, Directeur de Laboratoire à l'École des Hautes-Études.

Secrétaire général : **H. PIÉRON**, Agrégé de l'Université.

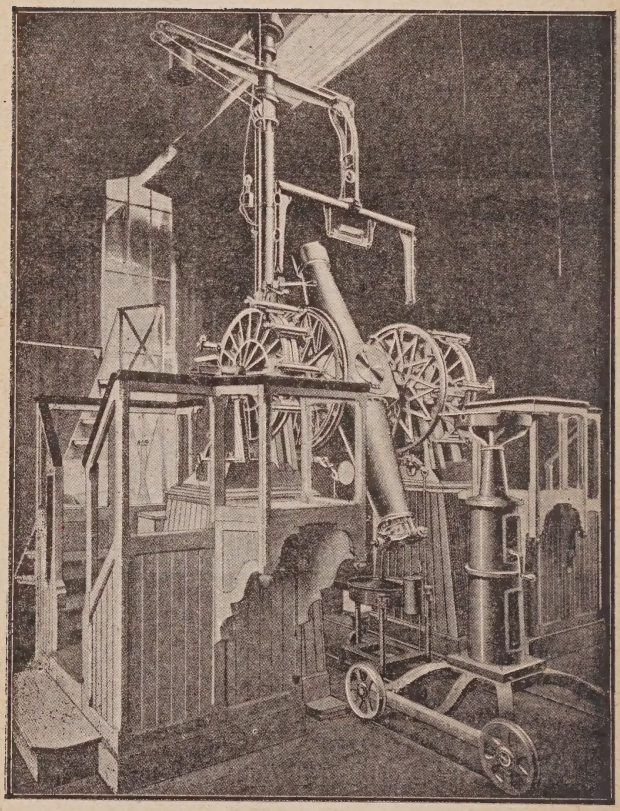
BIBLIOTHÈQUE D'ASTRONOMIE ET DE PHYSIQUE CÉLESTE

Directeur : **J. MASCART**

Astronome à l'Observatoire de Paris.

OBSERVATIONS MÉRIDIENNES

I



Instrument méridien (M. P. GAUTIER, constructeur).

As
B

LES

OBSERVATIONS MÉRIDIENNES

THÉORIE ET PRATIQUE

PAR

F. BOQUET

DOCTEUR ÈS SCIENCES MATHÉMATIQUES
ASTRONOME DE L'OBSERVATOIRE DE PARIS

TOME I

INSTRUMENTS ET MÉTHODES D'OBSERVATION

Avec 96 figures dans le texte.

105349
4/10/10

PARIS

OCTAVE DOIN ET FILS, ÉDITEURS

8, PLACE DE L'ODÉON, 8

—

1909

Tous droits réservés.

ERRATA

P. 73, l. 21, *au lieu de :* Howhü, *lire :* Hohwü.

P. 74, l. 21, *au lieu de :* Riefle, *lire :* Riefler; *au lieu de :* réchappement, *lire :* échappement.

P. 80, l. 24, *au lieu de :* Howhü, *lire :* Hohwü.

P. 92, l. 25, *après* barométrique, *ajouter :* et de température.

P. 165, note 1, *après* voir aussi, *ajouter :* 3.

P. 191, l. 12, *après* Lune, *ajouter :* Cette remarque suppose π et $\Delta\alpha$ constants; il est préférable de donner à ces quantités diverses valeurs entre les limites très restreintes données plus haut.

LES

OBSERVATIONS MÉRIDIENNES

THÉORIE ET PRATIQUE

NOTIONS PRÉLIMINAIRES

1. **Mouvement apparent des astres. Sphère céleste.** — Au premier aspect, par une nuit sereine, le *ciel* ou l'espace infini se réduit pour nous à un dôme immense légèrement surbaissé, sur lequel sont semés, sans ordre apparent, des milliers de points lumineux ou *étoiles*. Cette voûte semble reposer sur la surface de la Terre par une vaste circonférence dont l'observateur occupe le centre; cette circonférence qui limite notre vue s'appelle l'*horizon*.

Les étoiles sont isolées les unes des autres; les mesures que les astronomes modernes ont pu effectuer pour quelques-unes d'entre elles nous permettent de conclure que leurs distances à la Terre sont, en général, très différentes; cependant elles nous paraissent également éloignées. On conçoit alors aisément que les premiers hommes, incapables de soupçonner comment des corps isolés pourraient se maintenir dans l'espace,

supposèrent les étoiles fixées à une voûte solide et transparente, matérialisant ainsi une impression visuelle, un simple effet de perspective, conséquence de l'impossibilité où nous sommes d'apprécier, même approximativement, les distances auxquelles se trouvent les corps célestes.

La succession des jours et des nuits, le lever et le coucher des étoiles aux mêmes points de l'horizon, devaient, dans la suite des siècles, les amener à modifier la première conception du firmament. Pour les Pythagoriciens, l'observateur devient le centre d'une sphère immense, la *sphère céleste*, effectuant sa révolution ou son *mouvement diurne* autour d'un axe idéal, mouvement apparent produit, en réalité, par la rotation de la Terre autour du même axe. Mais les illusions exercent sur nos sens une impression si profonde, que bien peu d'esprits acceptèrent la théorie de Pythagore. Jusqu'au XVI^e^ siècle, le système de Ptolémée devait prévaloir. Il était réservé à Copernic et à Galilée de nous dévoiler, au moins dans ses grandes lignes, la véritable constitution de l'univers : le Soleil centre des mouvements planétaires, la Terre mise au rang des planètes et produisant, par sa rotation, l'illusion du mouvement de la sphère céleste.

Quoi qu'il en soit, la conception primitive d'une sphère de rayon très grand, entraînant dans son mouvement tous les astres, qu'ils soient fixes ou non sur la surface de cette sphère, continue à jouer un grand rôle en astronomie; familiarisés avec les apparences, il nous est commode d'en conserver le langage. Il est d'ailleurs de toute évidence que si nous nous bornons à l'étude des positions relatives des astres, abstraction faite des

distances, il ne saurait y avoir aucun inconvénient à substituer le mouvement apparent au mouvement vrai, l'illusion à la réalité.

2. **Axe du monde.** — L'*axe du monde* est cette droite idéale autour de laquelle s'effectue la rotation réelle de la Terre ou la rotation apparente en sens inverse de la sphère céleste. L'étude du mouvement apparent des étoiles montre que, quel que soit le point de la Terre où se trouve l'observateur, l'axe du monde semble toujours passer par le lieu de l'observation. C'est qu'en effet les dimensions de la Terre sont infiniment petites par rapport aux distances stellaires. La belle étoile Sirius, une des plus voisines de notre globe, se trouve à une distance de plus de 83 trillions de kilomètres. La détermination de la distance d'une étoile à la Terre est une opération astronomique difficile, et jusqu'à ces dernières années on ne connaissait guère que les distances d'une vingtaine d'étoiles. Les progrès de la photographie stellaire ont permis d'augmenter notablement le nombre des mesures, et l'on connaît aujourd'hui, avec quelque certitude, les distances à la Terre de plus de quarante étoiles. Ces distances sont comprises entre 41 trillions de kilomètres (α Centaure) et 441 trillions (α Petite Ourse). Et ce sont là très probablement des distances minima. On comprend alors que les dimensions de la Terre, qui, par rapport à nous, semblent considérables, sont réellement évanouissantes comparées aux immenses distances stellaires. Il en résulte que nous pouvons, d'une façon absolue, regarder toutes les droites qui vont d'un point quelconque de notre globe à une étoile comme rigoureusement paral-

lèles, ou, ce qui revient au même, considérer la Terre comme un simple point, centre de la sphère céleste. Nous verrons plus loin quelle correction il y a lieu d'appliquer aux astres du système solaire, le Soleil, les planètes et leurs satellites, aux comètes, lorsqu'on veut ramener leurs positions apparentes vues de la surface de la Terre à ces positions vues du centre. Les distances ne peuvent plus alors être regardées comme infinies par rapport au rayon de la Terre. Considérons, en effet, la planète Neptune, la plus éloignée du Soleil des planètes actuellement connues. Sa distance moyenne au Soleil n'est que de 4,5 billions de kilomètres, c'est-à-dire 9 000 fois plus faible que celle de l'étoile la plus proche, α Centaure. L'angle sous lequel de Neptune on voit le rayon de la Terre n'est que de $0'',3$; quoique faible, il n'est pas négligeable, et les différentes droites allant de Neptune à divers points de la Terre ne peuvent plus être considérées comme parallèles à la droite qui joint les centres de ces deux astres.

L'axe du monde perce la sphère céleste en deux points : l'un est le *pôle boréal* ou *pôle Nord*, voisin de l'étoile α Petite Ourse (appelée pour cette raison *Étoile polaire*) ; l'autre est le *pôle austral* ou *pôle Sud*, invisible en Europe ; il est situé dans la constellation de l'Octant, mais il n'existe pas d'étoile voisine de ce point qui le désigne particulièrement à l'attention.

Les étoiles voisines des pôles, c'est-à-dire celles qui n'en sont pas éloignées de plus de 5° à 6°, ont reçu le nom d'*étoiles circompolaires ;* ces étoiles jouent un rôle extrêmement important dans l'étude des instruments méridiens.

3. **Jour sidéral.** — Dans l'état actuel de la science, on doit admettre que la sphère céleste tourne autour de l'axe du monde d'un mouvement uniforme, accomplissant sa révolution en un temps constant que l'on appelle le *jour sidéral* et qui a été adopté par les astronomes comme unité de temps. Ainsi le jour sidéral est égal à la durée d'une révolution complète de la Terre; il équivaut à $23^h.\ 56^m.\ 4^s,09$ de temps moyen. Le jour sidéral se subdivise en vingt-quatre heures sidérales, comptées de 0 heure à 24 heures, l'heure en 60 minutes, la minute en 60 secondes; les fractions de la seconde s'évaluent en dixièmes et en centièmes.

4. **Équateur.** — Si par le centre de la sphère céleste on mène un plan perpendiculaire à l'axe du monde, ce plan coupe la sphère suivant un grand cercle, *l'équateur,* qui partage la sphère céleste en deux hémisphères portant les noms des pôles qu'ils contiennent, l'*hémisphère boréal* et l'*hémisphère austral.*

5. **Coordonnées d'observation.** — Nous allons examiner maintenant comment les très simples considérations qui précèdent peuvent nous conduire à fixer la position des astres dans le ciel ou, plus exactement, sur la sphère céleste.

Considérons trois axes rectangulaires OX, OY, OZ (fig. 1). La position d'un point E de l'espace sera complètement déterminée si on connaît la longueur ρ du rayon vecteur OE, l'angle θ de ce rayon avec l'axe OZ et l'angle ψ que fait avec l'axe OX la droite ON intersection du plan ZOE et du plan XOY.

Nous n'avons pas à nous occuper ici de la détermination du rayon vecteur. Rappelons seulement que

pour les étoiles on l'obtient par la résolution du triangle ayant pour base le grand axe de l'orbite terrestre et pour sommet l'étoile. L'angle ayant son sommet à l'étoile est extrêmement petit (1″,50 pour α Centaure), la résolution du triangle est donc très délicate. Les lois de Képler, en établissant une relation entre les

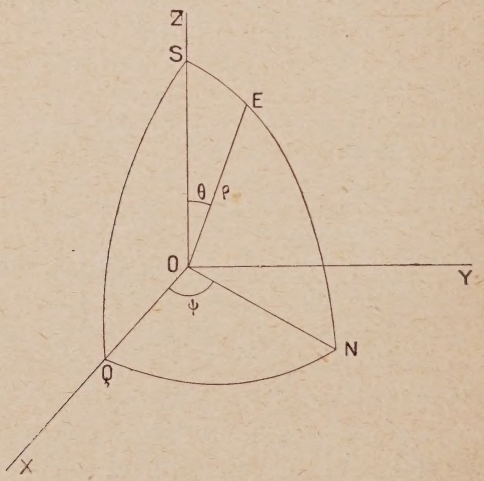


Fig. 1.

grands axes des orbites planétaires et les durées des révolutions de ces astres, ont permis de ramener la mesure des distances des planètes au Soleil à la mesure d'une seule, la distance du Soleil à la Terre. Les méthodes employées seront exposées dans un volume spécial de l'**E. S.**

Les observations nous donneront les angles θ et ψ qui définissent la direction OE. Plaçons l'origine O

des coordonnées au centre de la sphère céleste; les angles θ et ψ seront mesurés par les arcs de grand cercle SE et QN. Il ne nous reste plus qu'à fixer la position du plan XOY ou, ce qui revient au même, celle de l'axe OZ, puis à choisir sur l'arc QN une origine à partir de laquelle on comptera l'angle ψ, et enfin de désigner le sens où l'arc QN ira en croissant. Pour un observateur ayant les pieds en O et la tête vers Z, le *sens direct* est celui de Q vers N (droite à gauche); le sens contraire est dit *sens rétrograde*.

Pour fixer la position de OZ, il existe deux directions qui se prêtent également à la condition rigoureusement indispensable d'être faciles à déterminer; ce sont :

1° L'*axe du monde*, que nous venons de définir et dont on peut aisément obtenir la direction par les observations d'une étoile circompolaire à douze heures d'intervalle, ainsi que nous l'expliquons plus loin;

2° La *verticale* du lieu d'observation, c'est-à-dire la perpendiculaire au plan de l'horizon, ligne dont la direction est donnée par le fil à plomb.

Le plan déterminé par l'axe du monde et la verticale d'un lieu s'appelle le *plan méridien* de ce lieu.

6. **Coordonnées rapportées à l'axe du monde. Ascension droite et distance polaire.** — Faisons coïncider l'axe OZ avec l'axe du monde OP (fig. 2); le grand cercle QN sera alors l'équateur céleste. Dans une révolution sidérale, chaque point E de la sphère céleste décrit une circonférence de cercle O'E et l'axe du monde est le lieu géométrique des centres O' de ces cercles. Les rayons O'E sont d'autant plus petits que le point E est plus rapproché de l'un ou de l'autre pôle; le

maximum a lieu à l'équateur. Les cercles décrits par les astres se nomment *cercles parallèles*, ou simplement *parallèles*, à cause de leur parallélisme avec le plan de l'équateur. Le grand cercle PENP′ passant par l'astre E et l'axe du monde POP′ s'appelle *cercle de déclinaison*

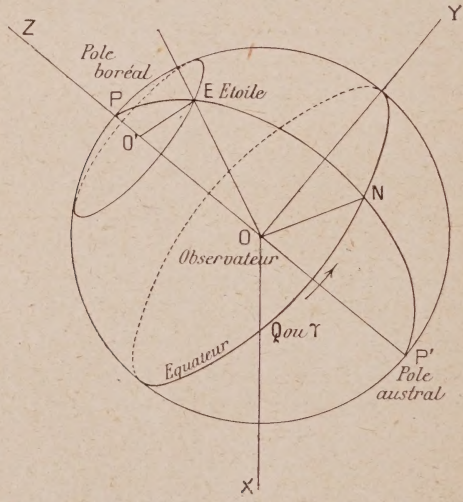


Fig. 2.

ou *cercle horaire;* nous verrons plus loin les raisons de ces dénominations.

La distance angulaire POE de l'astre E au pôle P, mesurée par l'arc PE sur le cercle de déclinaison, se nomme la *distance polaire* de l'astre; elle correspond à l'angle θ du § 5. Le point P étant le pôle géométrique de tous les parallèles, il est évident que la distance polaire d'un astre est une quantité qui ne change ni par

suite du mouvement diurne, ni par suite du déplacement de l'observateur sur la Terre.

Dans ce qui suit nous désignerons la distance polaire d'un astre par la lettre $\mathfrak{P}$. Les distances polaires se comptent de 0° à 180° à partir du pôle Nord. Chaque degré (°), rappelons-le, se divise en 60 minutes (′), la minute en 60 secondes (″), les fractions de seconde s'évaluent en parties décimales, dixièmes et centièmes. Au lieu de la distance polaire d'un astre, on considère souvent sa *déclinaison,* ou sa distance angulaire à l'équateur mesurée par l'arc EN du cercle PEN, nommé pour cette raison cercle de déclinaison. L'arc EN est évidemment le complément de l'arc PE. Nous désignerons la déclinaison d'un astre par la lettre $\mathfrak{D}$.

Les déclinaisons se comptent de 0° à 90° à partir de l'équateur; elles sont affectées du signe + dans l'hémisphère boréal et du signe — dans l'hémisphère austral, en sorte qu'on a, d'une façon générale, la relation

$$\mathfrak{P} + \mathfrak{D} = 90°,$$

en donnant à $\mathfrak{D}$ le signe convenu.

Plus les étoiles sont rapprochées des pôles, plus les arcs décrits dans un même temps par suite du mouvement diurne sont petits. Si nous prenons le rayon de la sphère céleste pour unité, le rayon O′E du parallèle de déclinaison $\mathfrak{D}$ sera égal à cos $\mathfrak{D}$. On a, en effet, dans le triangle rectangle OO′E :

$$O'E = OE \sin O'OE,$$

ou

$$O'E = \sin \mathfrak{P} = \cos \mathfrak{D}.$$

Le rapport des arcs parcourus, pendant le même temps, par une étoile de déclinaison $\mathfrak{D}$ et par une étoile

équatoriale est donc égal à cos (D), et la vitesse apparente du déplacement de cette étoile sera égale aussi à cos (D).

Le plan de l'équateur n'est pas rigoureusement invariable, il éprouve de petites variations dont il sera question plus loin (§ 105). La déclinaison d'une étoile à une époque donnée est alors celle qui se rapporte à la position de l'équateur à cette époque.

Les astronomes ont adopté pour origine Q de l'arc QN (angle ♑ du § 5) le *point vernal*, appelé encore *point équinoxial* ou *équinoxe du printemps*, point où le soleil traverse l'équateur en passant de l'hémisphère austral dans l'hémisphère boréal; on le désigne habituellement par la lettre grecque γ. L'*ascension droite* d'un astre est l'angle que fait le cercle de déclinaison PEN (fig. 2) de l'étoile avec celui passant par le point vernal Q ou γ. Les ascensions droites se comptent de 0° à 360° sur l'équateur, l'angle des deux cercles considérés ayant la même mesure que l'arc QN; on convient de considérer le sens direct comme étant celui des ascensions droites croissantes ; c'est celui indiqué par la flèche sur la figure, il est inverse du sens du mouvement diurne apparent. Nous désignerons l'ascension droite d'un astre par le monogramme ℛ (*ascensio recta*) ou par la lettre α. En comptant les ascensions droites de 0° à 360°, on évite l'introduction de valeurs négatives, comme on les a évitées en adoptant les distances polaires, au lieu des déclinaisons, pour fixer la position de l'astre sur son cercle de déclinaison.

Le mouvement diurne de la sphère céleste s'effectue en un jour sidéral ou 24 heures sidérales. Au lieu d'évaluer les ascensions droites en degrés, minutes et secondes d'arc, on les compte le plus souvent en

heures (^{h}), minutes (^{m}) et secondes (^{s}) de temps; les fractions de seconde s'évaluent en parties décimales, dixièmes et centièmes. On divise alors l'équateur en 24 parties égales; il est clair qu'une heure équivaut à 15°, et comme les fractions subséquentes sont les mêmes dans les deux numérations, une minute de temps vaut 15 minutes d'arc, etc. Ainsi

1 heure équivaut à 15°;
1 minute — 15′;
1 seconde — 15″.

La plupart des éphémérides astronomiques, et en particulier la *Connaissance des Temps ou des Mouvements célestes*, publiée chaque année par le Bureau des Longitudes, donnent des Tables facilitant la conversion du temps en parties de l'équateur ou, inversement, la conversion en temps des parties de l'équateur, transformations qu'on a souvent à effectuer en astronomie. Il suffit de jeter un coup d'œil sur ces Tables pour en comprendre l'usage.

On pouvait évidemment prendre comme origine des ascensions droites tout autre point de l'équateur céleste, par exemple le point d'intersection de l'équateur et du cercle de déclinaison d'une étoile déterminée. Voici la raison qui a fait préférer le point γ. Par suite du mouvement de la Terre sur son orbite, le Soleil semble décrire un grand cercle *ee* de la sphère céleste (fig. 3), cercle qu'on appelle l'*écliptique*. Le point vernal γ est l'intersection de l'écliptique *ee* et de l'équateur EE. De même que nous avons adopté l'équateur comme plan fondamental des coordonnées d'observation, de même en astronomie mathématique on adopte l'écliptique

comme plan fondamental des coordonnées de calcul, la *longitude céleste* et la *latitude céleste*, fréquemment employées, notamment pour déterminer les positions par rapport au Soleil des astres du système solaire. En prenant pour origine commune des ascensions droites et des longitudes le point γ, les calculs pour passer des coordonnées équatoriales aux coordonnées écliptiques ou inversement se trouvent facilités. La détermination du point γ se fait en mesurant les déclinaisons du Soleil $-\mathfrak{D}_a$ et $+\mathfrak{D}_b$ vers l'équinoxe en S_1 (hémisphère austral), puis en S_2 (hémisphère boréal), et en déterminant le moment où la déclinaison s'annule.

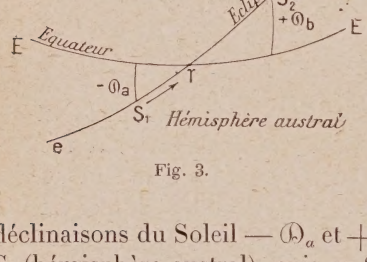


Fig. 3.

L'axe de rotation de la Terre dans son mouvement orbital ne se transporte pas en restant rigoureusement parallèle à une direction donnée; il éprouve de très petits déplacements, qui ont pour effet de changer un peu la position du point équinoxial. L'ascension droite d'une étoile à une époque donnée est alors celle qui se rapporte à la position du point vernal à cette époque. La position de l'écliptique n'est pas non plus absolument fixe, mais ses variations annuelles sont très faibles et ses variations diurnes tout à fait négligeables. Nous aurons à revenir sur ces points, ainsi que nous l'avons déjà dit plus haut, au sujet des étoiles repères adoptées par les astronomes, et qu'on désigne sous le nom d'*étoiles fondamentales*.

7. **Coordonnées rapportées à la verticale. Hauteur et azimut.** — Faisons coïncider l'axe OZ (fig. 1) non plus avec l'axe du monde, mais avec la verticale du lieu d'observation; le grand cercle QN sera alors l'horizon, intersection de la sphère céleste et du plan mené par l'observateur perpendiculairement à la verticale. On appelle encore ce grand cercle *plan horizontal;* il est parallèle à la surface libre d'un liquide en équilibre au lieu d'observation.

Dans l'étude du mouvement diurne de la sphère céleste, on est naturellement conduit à suivre les différentes positions qu'occupent les astres au-dessus de l'horizon géographique, seule région où on puisse les voir; mais, au point de vue des mesures à effectuer pour fixer leurs positions, nous supposerons le plan de l'horizon géographique comme coïncidant avec un plan parallèle mené par le centre de la Terre, le rayon de notre globe étant nul par rapport au rayon de la sphère céleste, que nous supposons infiniment grand. Ce plan parallèle à l'horizon réel et passant par le centre de la sphère céleste, s'appelle l'*horizon rationnel* ou *astronomique*. En d'autres termes, l'horizon visible et l'horizon rationnel, situés à une distance finie et égale au rayon de la Terre, interceptent sur la sphère céleste, de rayon infiniment grand, le même grand cercle. Et, pour l'observateur, la Terre est réduite à un point, centre de la sphère céleste; mais le champ de sa vision est limité à la moitié du ciel par l'horizon rationnel.

La verticale d'un lieu perce la sphère céleste en deux points qui sont les pôles de l'horizon : le *zénith* (de l'arabe *semt*, point) au-dessus de l'observateur, le *nadir*

(de l'arabe *nadhara*, vis-à-vis) au-dessous. Tout plan passant par la verticale est un *plan vertical;* il forme un angle dièdre droit avec le plan horizontal. Le plan vertical $P_zENP'_z$ qui passe par un astre E (fig. 4) s'appelle le *vertical* de cet astre. Le plan vertical qui passe par l'axe du monde est celui que nous avons appelé (§ 5) *plan méridien.*

L'intersection du plan méridien et de l'horizon s'appelle la *méridienne.* Les points où la méridienne coupe la sphère céleste sont le *Nord* (côté du pôle boréal de l'équateur) et le *Sud* (côté du pôle austral de l'équateur). Le *premier vertical* est le plan vertical perpendiculaire au plan méridien : son intersection avec l'horizon détermine la ligne *Est-Ouest.* Un observateur de l'hémisphère boréal, placé les pieds en O, la tête vers le zénith et regardant le Sud, aura à sa gauche l'Est, à sa droite l'Ouest.

Les petits cercles O'E (fig. 4) parallèles à l'horizon sont dits *parallèles de hauteur, cercles horizontaux* ou *almicantarats* (mot arabe ayant même sens, cercle horizontal).

La distance angulaire P_zOE de l'astre E au zénith, mesurée par l'arc P_zE sur le vertical de l'astre, s'appelle la *distance zénithale* de l'astre. La direction de la verticale dépendant de la position de l'observateur, la distance zénithale d'un astre varie avec le lieu d'observation. Il est bien évident, en outre, que pour un même point de la Terre elle varie aussi en raison du mouvement diurne. Nous la désignerons par la lettre z. Les distances zénithales se comptent de 0° à 180° à partir du zénith.

Au lieu de la distance zénithale, on considère sou-

vent la hauteur de l'astre au-dessus de l'horizon. La *hauteur* d'un astre E (fig. 4) est la distance angulaire EON, mesurée par l'arc EN du vertical de l'astre. Nous désignerons la hauteur par la lettre h. Les hau-

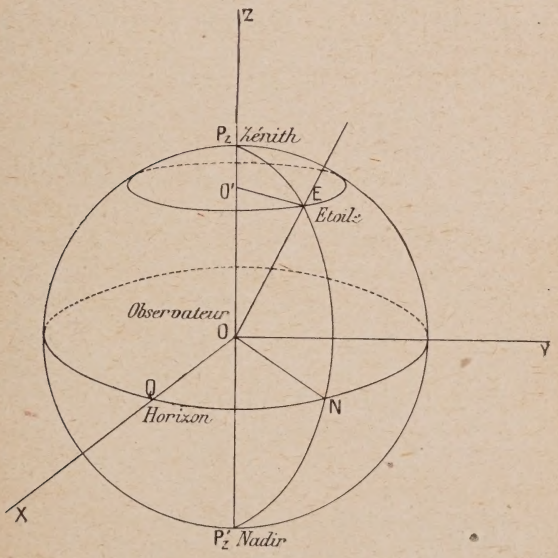


Fig. 4.

teurs se comptent de 0° à 90° à partir de l'horizon; elles sont affectées du signe + au-dessus de l'horizon, et du signe — au-dessous, en sorte qu'on a, d'une façon générale, la relation

$$z + h = 90°,$$

en donnant à h le signe convenu. Il est à peine besoin de dire que, quand la hauteur d'un astre est négative,

cet astre est au-dessous de l'horizon et par conséquent invisible.

Les astronomes ont adopté pour origine de la mesure de l'arc QN (angle ♄ du § 5), dans le système des coordonnées horizontales, l'intersection OS (fig. 5) du plan méridien et de l'horizon (partie Sud de la

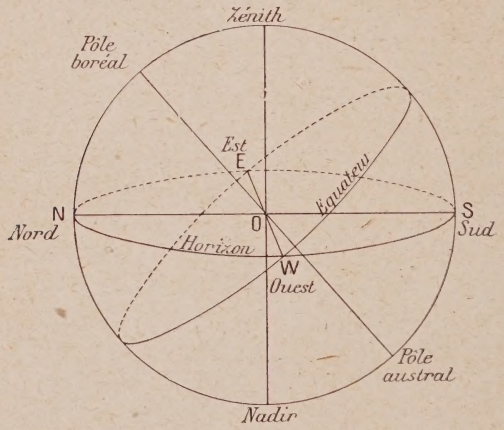


Fig. 5.

méridienne NS). L'*azimut* (de l'arabe *aszempt*, le chemin) d'un astre est l'angle que fait le vertical de l'étoile avec le plan méridien. On compte généralement les azimuts de 0° à 360° du Sud vers l'Ouest, mais cette règle n'est pas absolue comme pour les ascensions droites; dans la marine on les compte de 0° à 90° à partir des points cardinaux (Est-Sud-Ouest-Nord), dans le sens Est ou dans le sens Ouest, et on précise par l'indication du point origine et du point vers lequel on fait croître les azimuts; ainsi un azimut de 205°

s'écrira N. 25° E. Comme nous n'aurons à considérer que de très petites valeurs azimutales, nous les affecterons du signe + lorsqu'elles seront comptées vers l'Ouest et du signe — vers l'Est; cette convention est équivalente à la numération de 0° à 360°, les angles ε et $360 - \varepsilon$ ayant respectivement les mêmes lignes trigonométriques que les angles ε et $-\varepsilon$. Nous désignerons, dans le cours de cet ouvrage, les azimuts par la lettre grecque α.

Une étoile passe deux fois au méridien en un jour sidéral. Le *passage supérieur* est celui qui a lieu entre le pôle et le Sud, le *passage inférieur* entre le pôle et le Nord. Le minimum de la distance zénithale a lieu pour le passage supérieur, le maximum pour le passage inférieur. Si le pôle et le zénith se confondaient, la distance zénithale resterait constante et égale à la distance polaire. Si nous ne considérons que les passages supérieurs au Sud du zénith, il est aisé de voir que, pour Paris par exemple, de son lever jusqu'à son passage au méridien, la hauteur de l'astre va en croissant jusqu'à son maximum ou *culmination* (minimum de la distance zénithale), puis qu'elle décroît jusqu'à son coucher.

On remarquera, d'après les considérations qui précèdent, que, dans le système des coordonnées horizontales, la direction de l'axe OZ (§ 5) et l'orientation du plan XOY peuvent s'obtenir très aisément par l'observation (détermination de la verticale et de la méridienne : Nord-Sud).

8. **Angle horaire. Coordonnées horaires.** — Dans le système des coordonnées rapportées à l'axe du

monde, nous avons considéré les axes rectangulaires OX et OY (fig. 2) comme étant entraînés avec l'axe OZ, faisant ainsi participer ces axes au mouvement diurne. La position d'un astre E est alors déterminée à l'aide de coordonnées constantes, ou, plus exactement, n'éprouvant d'autres variations que celles résultant de son mouvement propre sur la sphère céleste et du déplacement des plans fondamentaux. Ces coordonnées, qui conviennent d'une façon toute particulière lorsqu'on veut donner un état du monde stellaire à une époque déterminée, ont reçu le nom de *coordonnées uranographiques*. Les catalogues d'étoiles donnent ces coordonnées pour l'époque à laquelle ils sont établis.

Laissons à la sphère céleste son mouvement apparent autour de l'axe du monde, mais donnons aux axes OX, OY (fig. 2) une direction invariable. L'angle XON (angle ψ du § 5), qui fixe la position du cercle de déclinaison, n'est plus constant, il varie proportionnellement au temps. On l'appelle l'*angle horaire*. Les deux coordonnées de ce système, l'angle horaire et la déclinaison, dont la dernière est la même que dans le système des coordonnées uranographiques, sont appelées *coordonnées équatoriales* ou *coordonnées horaires*. La direction adoptée par les astronomes pour fixer dans ce système l'orientation de l'axe OX est celle de la méridienne (ligne Nord-Sud). Les angles horaires se comptent de 0° à 360°, ou de 0 heure à 24 heures, à partir du méridien, dans le sens Est-Sud-Ouest (fig. 6), c'est-à-dire dans le sens du mouvement diurne. L'angle horaire de l'étoile e_2 est mesuré par l'arc SA_2, celui de l'étoile e_1 par l'arc $SWNA_1$.

Dans la pratique des observations méridiennes, on n'a

généralement à considérer que de très petits angles horaires, de quelques minutes au maximum. On les affecte alors du signe + après le passage de l'astre au méridien, et du signe — avant le passage.

Les deux notations sont évidemment équivalentes, les arcs $SWNA_1$ et $-SA_1$ (fig. 6) ayant les mêmes lignes

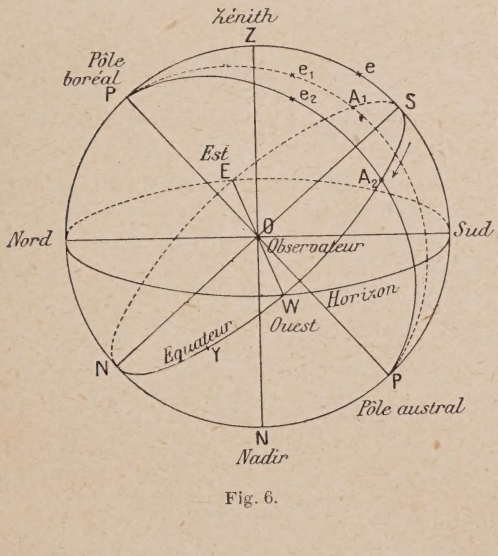


Fig. 6.

trigonométriques. On évalue d'habitude les angles horaires en minutes et fractions décimales (dixièmes et centièmes) de minute. Nous désignerons dans cet ouvrage les angles horaires par le monogramme $\mathcal{H}$ ou par la lettre t. Si l'on désigne par $2c$ l'ouverture angulaire du champ d'une lunette méridienne, l'angle horaire

maximum auquel on puisse observer une étoile de déclinaison $\mathfrak{D}$ est donné par la formule

$$t = \frac{c}{\cos \mathfrak{D}}.$$

Cette valeur maxima croît d'ailleurs avec la déclinaison; à l'équateur elle est égale à c; elle ne peut prendre des valeurs considérables que pour les étoiles voisines du pôle.

Nous démontrerons cette formule plus loin (§ 50).

9. **Relations : 1° entre l'ascension droite $\mathcal{R}$ et l'angle horaire $\mathcal{H}$; 2° entre la distance zénithale méridienne z et la déclinaison $\mathfrak{D}$.**

1° Les astronomes ont adopté comme origine du jour sidéral le moment où le point équinoxial γ passe dans le plan méridien. L'*heure sidérale* est alors égale à l'angle horaire du point vernal. Elle est donnée par l'horloge sidérale, c'est-à-dire par une horloge marquant $0^h.0^m.0^s$ au moment du passage du point γ dans le méridien, et réglée sur le jour sidéral, vingt-quatre heures pour une révolution complète de la sphère céleste.

Désignons par θ l'heure sidérale, c'est-à-dire l'arc $S\gamma$ (fig. 6). Soit PA_2 le cercle horaire d'une étoile e_2.

On a :

$$S\gamma = SA_2 + A_2\gamma,$$

ou, en employant les notations convenues :

$$\theta = \mathcal{H} + \mathcal{R},$$

d'où

$$\mathcal{R} = \theta - \mathcal{H}.$$

Ainsi, l'ascension droite d'un astre est égale à la différence entre le temps sidéral et l'angle horaire de cet astre. Il est facile de voir que cette formule est générale quelles que soient les positions relatives des points A_2, γ et S, en tenant compte des conventions sur la manière de compter les arcs.

Lorsqu'un astre e (fig. 6) est à son passage supérieur au méridien, l'angle horaire H de cet astre est nul, et son ascension droite est égale à l'heure sidérale. Par suite, il suffit de noter l'heure sidérale du passage supérieur au méridien d'un astre pour avoir son ascension droite. L'heure sidérale du passage inférieur en diffère de douze heures.

2° Nous aurons par la suite à faire usage de la relation

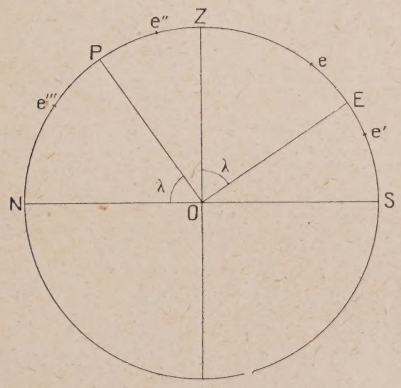


Fig. 7.

qui lie la déclinaison (δ) d'une étoile à sa distance zénithale minima (passage au méridien). Considérons (fig. 7) une étoile e entre le zénith Z et l'horizon Sud S à son

passage supérieur au méridien. On a, lorsque l'étoile e est entre le zénith Z et l'équateur E :

$$Ze = ZE - Ee, \quad \text{ou} \quad z = \lambda - \mathfrak{D};$$

λ étant la distance angulaire du zénith à l'équateur, distance égale à la hauteur PN du pôle au-dessus de l'horizon, les angles ZOE et PON ayant leurs côtés perpendiculaires.

Si l'étoile est au-dessous de l'équateur, en e', on a :

$$Ze' = ZE + Ee', \quad \text{ou} \quad z = \lambda + \mathfrak{D} = \lambda - (-\mathfrak{D}).$$

La première formule convient donc aux deux cas, en donnant à la déclinaison son signe.

Prenons l'astre en e'' entre le pôle P et le zénith Z; on a :

$$Ze'' = Ee'' - EZ, \quad \text{ou} \quad z = \mathfrak{D} - \lambda = -(\lambda - \mathfrak{D}).$$

Enfin si l'étoile est en e''' entre le pôle et l'horizon Nord (passage inférieur), on a :

$$Ze''' = Ee''' - EZ \text{ ou } z = 90 + \mathfrak{D} - \lambda = 180 - (\mathfrak{D} + \lambda).$$

10. **Coordonnées géographiques. Longitudes et latitudes terrestres.** — La Terre, que nous avons considérée jusqu'à présent comme une sphère dont le centre était le centre de la sphère céleste, a, en réalité, la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati dont le petit axe coïncide avec l'axe de rotation. L'ellipse méridienne diffère très peu d'une circonférence. En effet, désignons par a le demi-grand axe et par b le demi-petit axe du méridien terrestre; on a :

$$a = 6378253 \text{ mètres};$$

$$b = 6356521 \text{ mètres};$$

et l'aplatissement a pour valeur :

$$\frac{a-b}{a} = \frac{1}{293}.$$

Les points où l'axe de rotation (petit axe) perce le globe terrestre sont les *pôles* de la Terre ; ils ont les mêmes noms que les pôles correspondants de la sphère céleste. La trace du plan de l'équateur céleste sur la Terre se nomme l'*équateur terrestre*. L'équateur terrestre est évidemment un cercle, l'ellipsoïde étant de révolution autour du petit axe. La position d'un lieu de la surface terrestre est déterminée au moyen de deux coordonnées : la *longitude* et la *latitude géographiques ;* nous faisons ici abstraction de sa distance au centre.

La latitude géographique d'un point A (fig. 8) de la Terre est l'angle ALE que fait la verticale AL de ce point avec l'intersection EE' de l'équateur terrestre et de l'ellipse méridienne de A. On ne peut évidemment pas prendre comme mesure de cet angle l'arc d'ellipse AE, compris entre le lieu A et l'équateur, quoique, en réalité, cet arc diffère peu d'un arc de cercle. Les latitudes géographiques se comptent de 0° à 90° à partir de l'équateur ; elles sont affectées du signe + dans l'hémisphère boréal, du signe — dans l'hémisphère austral. Nous désignerons dans la suite la latitude du lieu d'observation par les lettres grecques λ ou φ.

Soient HH' la méridienne du lieu A, AP_1 la ligne qui joint le point A au pôle boréal, ligne parallèle à OP d'après ce que nous avons dit précédemment. Les angles aigus HAP_1 et ALE ont leurs côtés perpendiculaires, ils sont donc égaux. On peut donc dire que *la latitude d'un lieu est égale à la hauteur du pôle au-dessus de l'horizon.*

Le complément de la latitude se nomme la *colatitude;* c'est l'angle ZAP_1 ou la distance polaire du zénith, comme la latitude en est la déclinaison. On a entre la déclinaison $\mathfrak{D}$ d'une étoile, sa distance zénithale z et la latitude λ du lieu, les relations établies au § 9.

La *longitude géographique* d'un lieu A est l'angle

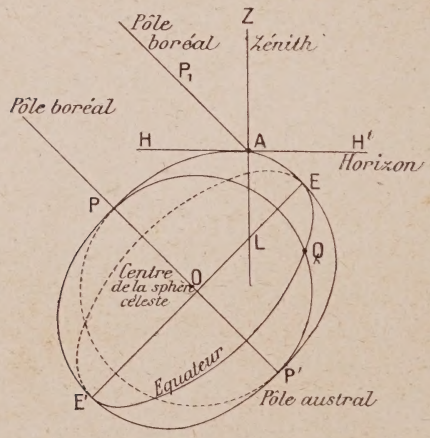


Fig. 8.

formé par le plan de l'ellipse méridienne passant par A avec le plan d'une ellipse méridienne PQP' prise pour origine, et qu'on appelle *premier méridien* ou *méridien principal.* La longitude est mesurée par l'arc d'équateur EQ compris entre les plans de ces deux ellipses. La longitude correspond à l'ascension droite ; mais, tandis que les ascensions droites se comptent de 0° à 360°, les longitudes géographiques se comptent de 0° à 180° vers l'Est ou l'Ouest ; on fait alors suivre le nombre de degrés,

minutes et secondes de la désignation : orientale ou occidentale, suivant que le lieu est à l'Est ou à l'Ouest du méridien origine. Le choix de l'origine est arbitraire. Un grand nombre de pays ont adopté comme méridien principal celui de l'Observatoire de Greenwich. En France, on a conservé comme premier méridien (méridien national) celui qui est déterminé par la méridienne de Cassini tracée dans la grande salle centrale du deuxième étage de l'Observatoire de Paris; c'est aussi celui qui passe par le sommet du pilier géodésique situé sur la terrasse supérieure. Ce premier méridien partage le bâtiment principal en deux parties égales; c'est le méridien 0° des cartes géographiques françaises. La latitude de l'Observatoire est celle de la façade méridionale du bâtiment central; elle est égale à $48°.50'.11''$. Les éléments astronomiques fournis par la *Connaissance des Temps* se rapportent au méridien de Cassini. Cette Ephéméride donne, à l'article « Positions des Observatoires », les latitudes et les longitudes de 215 observatoires, 198 situés dans l'hémisphère boréal et 17 dans l'hémisphère austral. Un seul, l'Observatoire de Quito, se trouve très voisin de l'équateur ($\lambda = -0°.14'$).

11. **Mouvement diurne apparent à différentes latitudes.** — Il est facile de se rendre compte de toutes les circonstances du mouvement diurne aux différentes latitudes et, en particulier, de la façon dont s'effectue le passage d'une étoile au méridien. Le plan horizontal d'un point A de la surface de la Terre coupe la sphère céleste suivant un grand cercle, l'horizon visible, qui sépare la partie visible du ciel de la partie invisible. La tangente HH' (fig. 9) à l'ellipse méri-

dienne OA décrit, dans le mouvement de rotation de la Terre autour de l'axe du monde PP′, un double cône circulaire droit dont le sommet est en I et dont l'axe est la droite PIP′. Ce cône intercepte sur la sphère céleste trois zones : HPH, HHH′H′, H′P′H′.

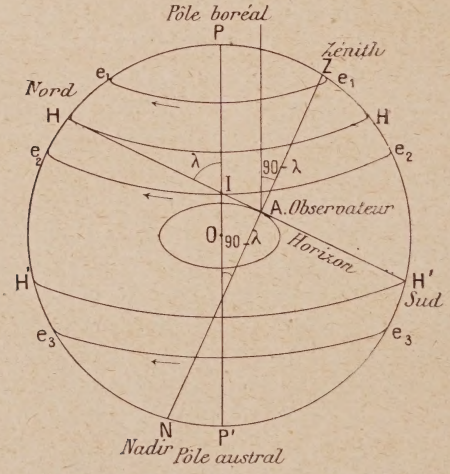


Fig. 9.

Examinons l'aspect variable du ciel à la latitude de 45° par exemple, intermédiaire entre le pôle et l'équateur : la France est comprise entre les 43° et 51° degrés de latitude Nord, et le plus grand nombre des observatoires se trouvent groupés entre le 40° et le 55° degré de latitude boréale, dans l'Europe centrale et occidentale et dans les États-Unis d'Amérique; le plus boréal est celui d'Abo (Finlande), $\lambda = +60°.27'$. Les étoiles

telles que e_1 situées dans la zone HPH, et pour lesquelles Pe_1 est inférieur à PH, ou

$$\mathfrak{P} < \lambda,$$

sont évidemment toujours au-dessus de l'horizon. Cette zone HPH est la *zone de perpétuelle apparition*, à laquelle appartiennent les étoiles circompolaires. Dans cette zone, les deux passages de l'étoile au méridien sont visibles : l'un au-dessus du pôle, du côté du zénith, est le passage supérieur, que nous désignerons en abrégé par les lettres PS ; l'autre au-dessous du pôle, entre le pôle et l'horizon, est le passage inférieur, désigné en abrégé par les lettres PI. Il est d'usage constant, dans la publication des observations méridiennes, de toujours désigner les passages inférieurs ; lorsqu'il n'est point fait mention du passage, il est sous-entendu qu'il s'agit d'un passage supérieur.

Considérons maintenant les étoiles telles que e_2 dont la distance polaire est intermédiaire entre PH et PH′, c'est-à-dire satisfaisant à l'inégalité

$$180 - \lambda > \mathfrak{P} > \lambda.$$

C'est la zone des étoiles ayant un *lever* et un *coucher*. Les astres de cette zone sont d'autant plus longtemps au-dessus de l'horizon, qu'ils sont plus voisins du parallèle passant par H qui limite les deux zones.

La zone H′P′H′ correspond aux étoiles constamment invisibles pour un observateur placé en A. Pour ces étoiles, Pe_3 est plus grand que PH′ ; c'est-à-dire :

$$\mathfrak{P} > 180^\circ - \lambda.$$

C'est la *zone d'invisibilité*.

Au pôle, la droite HIH′ devient perpendiculaire à l'axe

du monde OP; en d'autres termes, le zénith et le pôle se confondent, et le cône engendré par la révolution de IH autour de AP devient un plan. Lorsqu'on passe de la latitude de 45° à la latitude de 90°, l'angle au sommet du cône PIH (fig. 9) s'ouvre au fur et à mesure qu'on se rapproche du pôle. Il est clair qu'au pôle même (fig. 10) toutes les étoiles situées au-dessus de l'horizon HH', ou, ce qui revient au même, au-dessus de

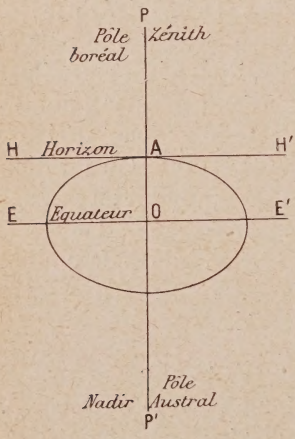


Fig. 10.

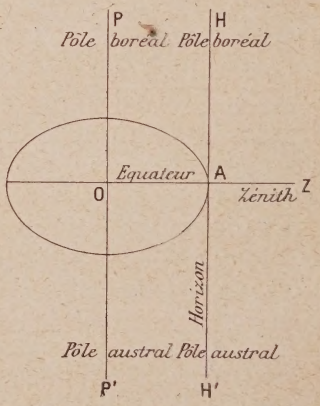


Fig. 11.

l'équateur EE', sont visibles. De sorte que toutes les étoiles d'un hémisphère sont visibles, toutes celles de l'autre invisibles. Il n'y a plus que deux zones; la zone intermédiaire du lever et du coucher n'existe pas. La hauteur d'une étoile reste constante.

A l'équateur (fig. 11), le cône devient un cylindre de révolution autour de OP, le plan de l'horizon est cons-

tamment tangent à ce cylindre : l'observateur voit en H le pôle boréal P et en H′ le pôle austral P′. Les parallèles des étoiles sont partagés en deux parties égales par le plan de l'horizon. Tous les astres ont un lever et un coucher, et chaque étoile reste pendant douze heures sidérales au-dessus de l'horizon, pendant douze heures au-dessous. Des étoiles qui seraient situées exactement aux pôles resteraient à l'horizon.

12. **Principe des observations méridiennes.** — Considérons un système de deux droites rectangulaires EW, *o*O (fig. 12), fixées invariablement l'une à l'autre, et orientons la ligne EW suivant la ligne Est-Ouest en la faisant reposer sur deux pivots. La droite *o*O, en tournant autour de l'axe de rotation EW, décrira le plan méridien, et l'on pourra la faire coïncider successivement avec la partie Nord AN de la méridienne, l'axe du monde AP, la verticale AZ vers le zénith, la partie Sud AS de la méridienne et la verticale AN vers le nadir. Imaginons que nous placions cette ligne *o*O de manière que son prolongement aille rencontrer une étoile *e* au moment de son passage au méridien :

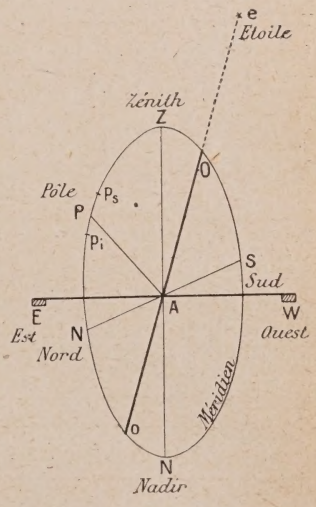


Fig. 12.

l'angle PAO sera la distance polaire $\mathfrak{P}$ de l'astre, et si nous avons noté l'heure, au même moment, sur la pendule sidérale réglée comme il a été dit, nous aurons l'ascension droite $\mathcal{R}$ de l'étoile e.

Dans la pratique, la droite Oo est remplacée par une lunette astronomique, afin d'augmenter la visibilité des astres, ainsi que leur déplacement apparent. On la pointe de façon à amener l'image de l'étoile en coïncidence avec le point de croisement (dans le plan méridien) de deux fils situés dans le plan focal de l'objectif. La ligne Oo est celle qui joint le centre optique de l'objectif à l'intersection des deux fils. L'axe de rotation EW porte un cercle gradué dont le centre est sur cet axe ; un index est placé en regard de la graduation. Pointons la lunette vers le pôle, ce qui se fait en prenant la moyenne $\frac{1}{2}(e_s + e_i)$ des lectures de la graduation correspondant à deux passages successifs p_s et p_i d'une circompolaire, l'un au-dessus, l'autre au-dessous du pôle. La différence entre cette lecture moyenne et celle du pointé sur l'étoile est la distance polaire de l'astre.

On peut encore déterminer l'angle de la verticale du lieu d'observation et de l'axe du monde, c'est-à-dire la colatitude. Pour l'obtenir, on dirige la lunette vers le nadir, sur un miroir horizontal (surface libre d'un bain de mercure ou d'huile), et l'on fait coïncider la croisée des fils avec son image. La lecture du cercle, augmentée de 180°, est celle du zénith, qui, par différence avec la lecture du pôle, donne la distance polaire du zénith. Lorsqu'on aura, dans une observation, déterminé la lecture au zénith et la lecture sur l'étoile, on en conclura aisément soit la distance polaire, soit la déclinaison.

Ce qui précède indique la double opération qu'on doit effectuer pour obtenir, à l'aide de mesures faites dans le plan méridien, les coordonnées uranographiques d'un astre.

Le plus ancien instrument d'astronomie répondant à cette double détermination est probablement le *gnomon*, véritable instrument méridien, puisque c'est par les variations des ombres méridiennes qu'il fait connaître la marche du Soleil sur la sphère céleste, mais combien peu précis! C'est l'astronome danois Rœmer (XVII^e siècle) qui, le premier, a eu l'idée d'orienter dans le plan méridien la lunette astronomique découverte à la fin du XVI^e siècle. Nous n'avons pas à faire ici l'historique de la lunette méridienne; ce sujet sera traité dans un volume spécial de l'**E. S.**; nous dirons seulement que jusqu'au début du XIX^e siècle les astronomes se servaient simplement de *Quarts de cercle*, qui furent remplacés d'abord par deux instruments séparés : la *lunette méridienne* ou *lunette des passages*, pour la détermination des ascensions droites; le *cercle mural* (cercle entier), pour la mesure des déclinaisons. Il y a encore actuellement à l'Observatoire de Paris une Lunette méridienne et un Cercle mural de Gambey, installés respectivement en 1838 et 1843 sous Arago; à Uccle (Observatoire royal de Belgique), on utilise une Lunette de Gambey datant de 1835; à l'Observatoire du Cap de Bonne-Espérance, les observations de 1834 à 1855 ont été faites avec un instrument des passages et un cercle mural, etc. Cette disposition présente cependant un inconvénient, c'est qu'elle exige deux observateurs. De plus, lorsqu'on observe des astres très faibles, il peut arriver que le nombre de ces astres dans le champ de l'instrument

soit assez considérable. Comme rien, à la simple vue, ne les distingue les uns des autres, si ce n'est leur éclat, les deux observateurs peuvent souvent ne pas observer la même étoile. On ne pourrait non plus songer à employer le cercle mural pour la détermination précise des ascensions droites, son mode de monture ne se prêtant pas, comme nous le verrons, à la détermination précise de son orientation. Pour obvier à cet inconvénient, les constructeurs modernes réunissent les deux instruments, lunette et cercle, en un seul. L'instrument prend alors le nom de *cercle méridien*.

C'est ainsi qu'en 1855, au Cap, on installe un cercle méridien construit sur les plans d'Airy et semblable à celui déjà établi à Greenwich ; qu'en 1863, Le Verrier fait construire le Grand Cercle méridien de l'Observatoire de Paris, etc. Cependant, au point de vue de l'exposition de la théorie des instruments méridiens, il est commode de considérer séparément la lunette des passages et le cercle des distances polaires. C'est ce que nous ferons dans la suite de cet ouvrage.

LIVRE I

L'INSTRUMENT DES PASSAGES OU LUNETTE MÉRIDIENNE

CHAPITRE I

LA LUNETTE

13. **Lunette méridienne.** — La lunette méridienne se compose d'une lunette astronomique Oo dont l'axe optique est perpendiculaire à un axe horizontal EW, auquel elle est invariablement liée (fig. 13). Cet axe, orienté suivant la ligne Est-Ouest, est terminé par deux tourillons T,T (figurés en lignes ponctuées) bien travaillés, c'est-

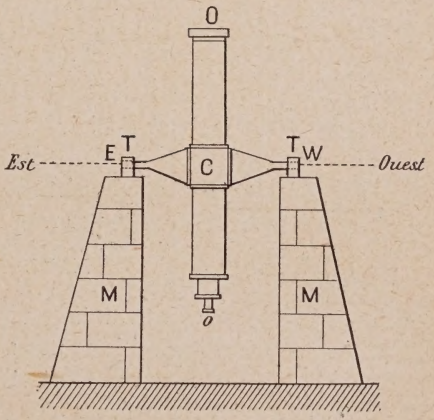


Fig. 13.

à-dire rigoureusement circulaires et de même diamètre. Ces tourillons reposent dans les cavités hémicylindriques de deux coussinets identiques E, W, scellés solidement sur les assises horizontales supérieures de deux massifs de pierre M, M, dont les fondations reposent sur un sol très stable.

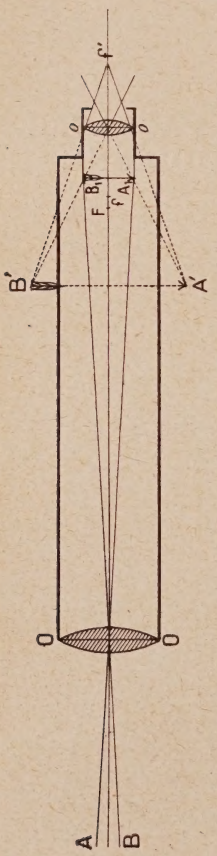


Fig. 14.

On trouvera, dans le volume *Optique* de l'**E. S.**, la description et la théorie optique de la lunette astronomique. Nous rappellerons seulement que cet instrument comprend essentiellement : un objectif convergent OO (fig. 14), donnant au delà et très près du foyer F une image A_1B_1 réelle, renversée et petite de l'objet AB ; un oculaire convergent *oo* jouant le rôle de loupe, donnant une image virtuelle agrandie $A'B'$, droite par rapport à A_1B_1, renversée par conséquent relativement à l'objet AB, ce qui n'offre aucun désavantage pour la mesure des positions des astres, mesure que l'on rapporte toujours au centre. Le foyer *f* de l'oculaire doit se trouver près de l'image réelle A_1B_1 du côté de l'objectif et dans le voisinage du foyer F de cet objectif. La figure 14

indique la marche des rayons lumineux dans la lunette astronomique. Ceci rappelé, nous étudierons l'objectif et l'oculaire, en nous plaçant surtout au point de vue spécial de la lunette méridienne.

14. **Objectif.** — La lunette méridienne étant destinée à la vision d'objets très éloignés et souvent peu éclairés, l'objectif doit être d'assez grande dimension, de façon qu'il reçoive assez de lumière et qu'il donne une image de l'astre dont l'éclairement soit suffisant. On ne peut cependant dépasser une certaine limite, car alors il faudrait donner aux tubes des dimensions trop considérables, ce qui pourrait compromettre leur rigidité. La lentille objective du Grand Instrument méridien de l'Observatoire de Paris a $0^m,236$ de diamètre; la longueur du tube entre l'objectif et l'oculaire est de 4 mètres environ; c'est la plus grande des lunettes méridiennes.

L'objectif d'une lunette méridienne se compose généralement de deux lentilles : l'une FF (fig. 15) concave-convexe, en flint; l'autre CC biconvexe, en crown. La face COC doit être placée extérieurement, c'est-à-dire vers l'objet. Les rayons de courbure des trois surfaces et le rapport des épaisseurs sont déterminés par le calcul, en tenant compte des valeurs des indices de réfraction des deux verres, afin que les images soient aussi parfaites que possible. Ces lentilles sont juxtaposées par leurs faces GH et CIC, puis placées dans un barillet dont les colliers, celui de l'extérieur et celui de l'intérieur, serrent le système des deux lentilles simplement de manière à éviter tout ballottement et sans le comprimer. On place généralement, près des.

bords, de petites cales en papier d'un tiers de millimètre environ. La pression des colliers sur le contour des lentilles s'exerce alors sur ces cales. En somme, il faut que les surfaces intérieures restent rigoureusement parallèles, qu'elles aient même centre et que le serrage de la monture ne déforme pas les surfaces des deux verres. Copeland[1], qui s'est occupé d'une façon toute

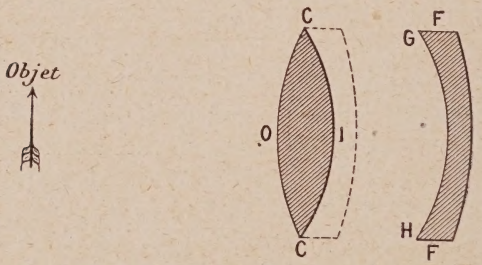


Fig. 15.

particulière des perfectionnements qu'on devrait apporter aux lunettes méridiennes, pensait qu'il y aurait plus de sécurité, au point de vue de la stabilité du système optique, à coller les deux verres de l'objectif.

La *matière* des lentilles objectives doit être aussi homogène que possible, c'est-à-dire que le verre doit avoir partout la même composition et ne pas enfermer de bulles d'air dans sa masse. Les artistes verriers sont parvenus de nos jours à fondre des masses de verre d'une grande limpidité. Pour s'assurer de la qualité du verre d'un objectif, on dirige la lunette vers un objet assez brillant, la Lune, par exemple, et après avoir mis

[1] Copeland, 1, *Monthly Notices*, vol. XLIV, p. 415.

l'œil à la place de l'oculaire préalablement enlevé, on examine les différentes parties de la lentille. Dans un bon objectif on ne doit constater ni taches, ni ombres, ni raies; sa surface doit être d'un éclairement uniforme.

Le *faux centrage* consiste en ce que les centres optiques du flint et du crown ne coïncident pas. L'oculaire étant rapproché du foyer, si l'on examine une étoile zénithale, l'image aura un bord plus rouge que l'autre s'il y a défaut de centrage. Une belle étoile observée près de l'horizon avec un objectif bien centré a l'aspect d'un spectre vertical, le rouge à la partie supérieure; ce spectre va en s'atténuant à mesure qu'on s'élève au-dessus de l'horizon : il est produit par la dispersion atmosphérique.

L'objectif doit être exempt d'*aberration chromatique* ou *de réfrangibilité;* c'est-à-dire que les images ne doivent présenter aucune irisation. Un des meilleurs procédés pour s'assurer que l'objectif est achromatique consiste à observer la Polaire (α Petite Ourse) avec un oculaire dont le grossissement soit environ le double du diamètre de l'objectif exprimé en millimètres. Ainsi pour le Grand Instrument méridien cité précédemment, on emploiera un grossissement de 500 fois. L'image de l'étoile amenée en avant ou en arrière du foyer principal par le déplacement de l'oculaire doit offrir l'aspect d'un disque blanc frangé de rouge dans le premier cas, et d'un simple disque blanc dans le second. Avec une étoile bleuâtre comme Véga (α Lyre), il n'y a pas de frange rouge intérieurement au foyer, mais avec Betelgeuse (α Orion), étoile rouge, la frange rouge serait plus accentuée qu'avec la Polaire. Avec les anciennes lunettes à très long foyer, l'aberra-

tion chromatique se trouve très réduite; mais pour les lunettes méridiennes, ainsi que nous l'avons déjà dit, il y a inconvénient à avoir une distance focale trop grande, à cause des déformations que peut éprouver le tube de la lunette. L'ancienne lunette méridienne de Ramsden[1], à Toulouse (1803), avait $0^m,11$ d'ouverture et $2^m,50$ de distance focale $\left(\text{rapport} = \frac{1}{23}\right)$; la lunette du cercle méridien de M. P. Gautier, installé en 1891 au même observatoire, a $0^m,20$ d'ouverture et $2^m,35$ de distance focale $\left(\text{rapport} = \frac{1}{12}\right)$. D'une façon générale, on a :

$$12 < \frac{\text{Distance focale}}{\text{Ouverture de l'objectif}} < 18$$

pour le plus grand nombre de lunettes méridiennes. M. Taylor[2] a construit récemment des objectifs à trois verres d'un achromatisme parfait. La première lentille biconvexe est en flint baryté, la deuxième biconcave est en flint boro-silicaté, et la troisième biconcave aussi est en crown silicaté. Le seul inconvénient de ces objectifs serait leur épaisseur, une fois et demie celle des objectifs ordinaires de même ouverture. Nous ne pensons pas que ce genre d'objectif ait été utilisé dans la construction des lunettes méridiennes.

L'*aberration de sphéricité* provient de ce que les lentilles objectives n'ont pas les courbures voulues, de sorte que les rayons extérieurs et centraux ne con-

[1] Baillaud, *Annales de l'Observatoire de Toulouse*, t. II, 2e partie, p. 5, et t. IV, Introduction, p. III.

[2] Taylor, *Monthly Notices*, vol. LIV, p. 328.

vergent pas vers un même point et que les images manquent de netteté. On met en évidence le défaut d'aberration sphérique en examinant l'image d'une étoile de moyenne grandeur, une troisième par exemple, hors du foyer sous un grossissement moyen. Si l'on tire l'oculaire au delà du foyer de manière à avoir un système de trois ou quatre anneaux, il y aura augmentation d'éclat et élargissement des deux anneaux extérieurs. Si l'on rapproche l'oculaire de l'objectif, les anneaux centraux seront très faibles, mais les anneaux extérieurs seront épais et brillants dans le cas où les rayons extérieurs convergent plus près de l'objectif que les rayons médians; le contraire se produira si l'on éloigne l'oculaire. On peut encore procéder par sectionnement de l'objectif. Après avoir mis au point sur une étoile de troisième grandeur avec tout l'objectif, on place sur lui un diaphragme en réduisant l'ouverture libre au quart. Si l'aberration sphérique est insensible, l'image de l'étoile reste bien au point.

Parmi les défauts que peut présenter un objectif, le plus fréquent peut-être est l'*aberration zonale :* la lentille est divisée en zones de foyers différents. Pour constater ce défaut, on observe une étoile de première grandeur avec un oculaire à fort grossissement, qu'on déplace en avant ou en arrière du foyer de manière à obtenir de huit à vingt anneaux. S'il y a aberration zonale, les anneaux seront irréguliers, il n'y aura pas de gradation dans leur éclat.

Steinheil[1] a eu l'idée de construire une série d'objectifs dont chacun offre un des défauts à analyser,

[1] Steinheil, *Astr. Nach.,* vol. CIX, col. 209; voir aussi *The sidereal Messenger,* vol. III, p. 225.

puis de montrer comment ces défauts se manifestent sur l'image d'une étoile quand on déplace l'oculaire. Cette importante question de l'examen des objectifs a été exposée avec une grande précision et d'une façon éminemment pratique par MM. Cooke et fils[1], de York. M. Maurice Farman[2] a donné dans le *Bulletin de la Société astronomique de France* un résumé de certains chapitres de cet ouvrage, résumé qui donne à l'astronome le moyen de procéder à l'examen complet de l'objectif d'une lunette. La même question a été traitée, d'après la même source, par Gélion Towne[3]. Il y a dans l'étude des objectifs une précaution importante à prendre, c'est de s'assurer par des expériences convenables que l'observateur a une vue exempte de défauts. On ne devra porter un jugement définitif sur un objectif qu'après l'avoir fait examiner par plusieurs observateurs.

L'astronome doit apporter tous ses soins à l'entretien et à la bonne conservation des objectifs. En général, il n'y a lieu de procéder au nettoyage des verres intérieurement que de loin en loin. On évite de le faire fréquemment, car il est presque impossible dans le remontage des verres de ne pas déplacer l'axe optique, même en repérant avec soin les lentilles et le barillet; ce déplacement modifie donc la position de l'instrument par rapport au méridien. Lorsqu'un nettoyage sera nécessaire, il suffira le plus souvent d'épousseter légèrement les sur-

[1] Cooke, *On the adjustment and testing of telescopic objectives;* voir aussi *The Observatory*, vol. XIV, p. 380.

[2] Farman, *Bulletin de la Société astronomique de France*, année 1905, p. 408.

[3] Towne, *Astronomie pratique*, t. I, p. 233.

faces intérieures, avec une brosse extrêmement douce, pour en faire tomber les poussières, surtout sur la lentille de flint, où elles adhèrent moins que sur celle de crown. S'il est nécessaire de mouiller les surfaces, on le fera avec un tampon d'ouate imbibé d'alcool, en frottant légèrement en spirale. Les verres non collés sont plus faciles à nettoyer. On doit, lorsque l'instrument n'est pas utilisé, couvrir l'objectif à l'aide d'un capuchon de soie ou d'un couvercle métallique. Pendant les observations, il arrive assez fréquemment que l'objectif se recouvre de buée. En hiver, cette vapeur peut se congeler et rendre les observations impossibles. On obvie à cet inconvénient, au moins en partie, en faisant en sorte que l'objectif soit dépassé par le tube qui porte le barillet. On évite aussi, par ce dispositif, les rayons des astres très éclairés, comme la Lune ou le Soleil, qui viennent frapper obliquement l'objectif.

Les variations de température ont une influence sensible sur la forme des surfaces objectives. Dans l'étude de l'aberration de sphéricité ou de l'aberration zonale d'un objectif, il est nécessaire d'attendre que les lentilles soient en équilibre de température avec l'air extérieur, ce qui peut demander un temps assez grand, une demi-heure par exemple. M. Sundell[1] a fait une série de recherches relatives à l'influence de la température sur la longueur focale d'un objectif astronomique. Il résulte des expériences faites au laboratoire de l'Université d'Helsingfors que la variation est extrêmement faible, environ 0,00002 de la distance focale par degré centigrade.

[1] Sundell, *Astr. Nach.*, vol. CIII, col. 19, et vol. CXI, col. 257.

15. **Oculaire.** — L'oculaire est le système de lentilles avec lequel on regarde l'image donnée par l'objectif. Comme la lunette méridienne doit servir à des mesures angulaires, on ne peut faire usage que de l'oculaire positif ou de Ramsden, dont les lentilles, situées au delà de l'image focale réelle, permettent de placer dans le plan focal de l'objectif les fils mobiles qui servent à effectuer ces mesures. Si l'on ne faisait usage que de fils fixes, on pourrait employer l'oculaire négatif ou de Huyghens; les fils se placeraient alors entre les lentilles.

L'oculaire de Ramsden (fig. 16) se compose de deux lentilles plan-convexes C, C′, dont les faces convexes sont tournées l'une vers l'autre. Les deux lentilles ont la même distance focale, et l'intervalle qui les sépare est égal aux deux tiers de cette distance focale. La lentille C, située du côté de l'objectif, est la lentille intérieure ou lentille de champ; l'autre C′, du côté de l'œilleton, est la lentille extérieure ou oculaire. Dans un grand nombre d'oculaires, la lentille extérieure a une distance focale un peu moindre que celle de la lentille de champ; on règle en conséquence la distance des deux lentilles. On peut augmenter un peu, de cette façon, le grossissement de l'oculaire.

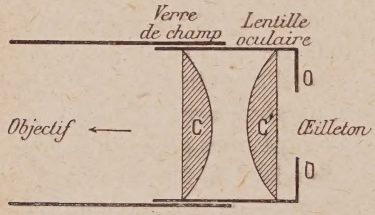


Fig. 16.

L'image virtuelle donnée par l'oculaire devant être reportée à la distance de la vision distincte, l'oculaire

est assujetti dans un tube glissant à frottement dur dans un second tube faisant corps avec la lunette. On peut donc donner à l'oculaire la position qui convient à la vue de l'observateur. En avant de la lentille oculaire, on place une plaque percée d'une petite ouverture circulaire centrale OO (œilleton) et contre laquelle on applique l'œil (point oculaire ou cercle de Ramsden). Avec les forts grossissements, le point oculaire est très rapproché de l'oculaire.

Le tube qui supporte l'oculaire *o* (fig. 17) est géné-

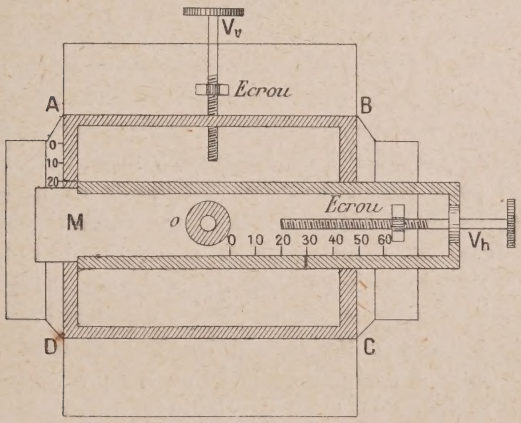


Fig. 17.

ralement fixé sur une double plaque : la vis V_h entraîne le cadre ABCD dans le sens horizontal et la vis V_v la plaque M qui porte le tube de l'oculaire dans le sens vertical ; l'écrou de la vis V_v fait corps avec le cadre ABCD, la plaque M glisse dans l'intérieur de ce cadre. On peut donc, par ce double mouvement, amener le centre

de l'oculaire à tel point du champ qu'on juge à propos, en particulier devant le fil où doit se faire le pointé. L'angle horaire maximum défini au § 8 peut être augmenté par le déplacement de l'oculaire.

Nous verrons plus loin, lorsque nous parlerons des procédés d'observation, que pour le Soleil on doit déterminer les heures des passages au méridien des deux bords, ainsi que les déclinaisons du bord supérieur et du bord inférieur. Cette observation exige une certaine habileté : l'observateur doit, dans un temps assez court, déplacer la plaque de l'oculaire pour passer d'un bord à l'autre, en même temps qu'il agit sur les vis des fils du micromètre. Il en résulte que les observations sont faites précipitamment. Pour obvier à cet inconvénient, Gruey[1] a imaginé de fixer sur la plaque porte-oculaire, trois oculaires différents : l'oculaire central pour les observations des bords en ascension droite, les deux autres situés à une distance du premier égale au demi-diamètre apparent du Soleil et permettant de pointer le bord supérieur et le bord inférieur. L'observateur, au lieu de déplacer l'oculaire, n'a qu'à déplacer légèrement la tête, ce qui se fait beaucoup plus rapidement et laisse la libre disposition de la main pour agir sur les vis micrométriques. L'emploi de cet oculaire ne semble pas s'être généralisé. Dans l'oculaire triple que M. P. Gautier a construit pour l'Observatoire de Besançon, le champ de chaque oculaire est de 5′ et le grossissement 150.

[1] Gruey, 2, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. CVI, p. 585.

16. **Grossissement.** — Le grossissement d'une lunette astronomique est le rapport qui existe entre l'angle sous lequel l'observateur voit l'image A'B' (fig. 14) et l'angle sous lequel il verrait l'objet AB sans instrument. On démontre, en physique, que ce rapport est égal au rapport $\frac{F}{f}$ des distances focales du système objectif et du système oculaire. Il suffit donc de mesurer ces distances focales. Comme ces systèmes sont équivalents à de simples lentilles convergentes, on déterminera pour chacune d'elles la distance du centre de la lentille à la petite image qu'elle donne du Soleil.

Le grossissement a aussi pour valeur le rapport $\frac{\Omega}{a}$ du diamètre de l'objectif à celui de l'anneau oculaire (image de la surface de l'objectif formée par l'oculaire).

Le dynamètre de Ramsden permet (fig. 18) d'obtenir très rapidement la valeur du grossissement. Une plaque translucide *mm*, montée dans un tube T, se place en avant de l'oculaire, de manière que l'image de l'objectif, éclairée par la lumière diffuse, vienne y former un cercle lumineux bien net : sur cette plaque on a tracé une division en dixièmes de millimètre. On observe la graduation au moyen d'une loupe composée, montée dans un tube T'T' qui glisse à frot-

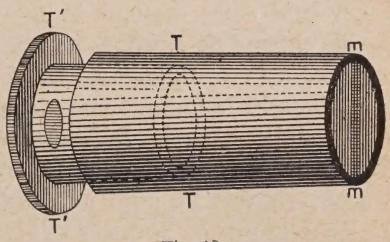


Fig. 18.

tement dans le premier tube T, de façon que l'on puisse mettre au point sur l'échelle et mesurer exactement le diamètre du cercle brillant. Supposons que pour un objectif de $0^m,236$ d'ouverture nous ayons trouvé 16 divisions de l'échelle du dynamètre; le grossissement sera : $\frac{2360}{16}$, ou 147.

On peut encore mesurer le grossissement par le procédé de Galilée perfectionné par Pouillet, et qui consiste à compter le nombre n de divisions d'une échelle divisée vues à l'œil nu, correspondant à une division vue à travers la lunette. Le corps de la lunette masquant l'échelle, on la rend visible à l'aide de deux miroirs situés en regard l'un de l'autre et inclinés à 45° sur l'axe de la lunette; le second de ces miroirs est percé d'un petit trou en face de l'œilleton de l'oculaire.

On peut aussi mesurer le grossissement à l'aide du double prisme de Rochon, suivant la méthode indiquée par Arago. (Voir *Optique* **E. S.,** *à la double réfraction*).

M. Ceraski[1] a indiqué une méthode que Callandreau[2] a reproduite dans le *Bulletin astronomique*. Dans le champ de vision d'une lunette munie d'un oculaire à prisme, on voit un segment sombre. Supposons l'une des faces du prisme normale à l'axe optique de la lunette. En appelant a la distance du sommet de ce segment au milieu du champ, α l'angle du prisme, n l'indice de réfraction, γ l'angle limite, on a, en posant :

$$\beta = \alpha - \gamma, \quad \sin u = n \sin \beta,$$

[1] Ceraski, *Astr. Nach.*, vol. CI, col. 247.
[2] Callandreau, *Bull. astr.*, t. XIV, p. 74.

pour la valeur du grossissement g, l'expression

$$g = \frac{\operatorname{tang} u}{\operatorname{tang} a}.$$

L'angle a est petit; on a alors :

$$\operatorname{tang} a = a \,.\, \operatorname{tang} 1'',$$

$$\frac{1}{\operatorname{tang} a} = \frac{1}{a} \cdot \frac{1}{\operatorname{tang} 1''} = \frac{1}{a} \,.\, 206\,265'';$$

ou, si l'on exprime a en minutes,

$$\frac{1}{\operatorname{tang} a} = \frac{1}{a} \cdot \frac{206\,265''}{60} = \frac{3\,438'}{a},$$

et finalement :

$$g = \frac{3\,438 \operatorname{tang} u}{a}.$$

La distance a peut se déterminer au moyen de passages d'étoile. La détermination est simple pour une lunette à réticule, comme c'est le cas pour la lunette méridienne. Il suffit de tenir le prisme tout près de l'oculaire et d'apprécier la distance a à la croisée des fils au moyen des distances des fils, comme nous l'expliquerons plus loin.

Il n'existe pas de règle fixant le rapport entre le diamètre de l'objectif et le grossissement. Si l'on appelle d le diamètre exprimé en millimètres de la partie efficace des lentilles objectives, on pourra prendre un grossissement g satisfaisant à l'inégalité

$$d < 2\,g < 3\,d.$$

Ainsi, pour le Grand Instrument méridien de l'Observatoire de Paris, d est égal à 236 millimètres, g pourra être compris entre 120 et 350, en chiffres ronds. Pour les

astres faibles, on doit se rapprocher de la limite inférieure. Dans les observatoires très élevés, on peut dépasser de beaucoup la limite supérieure, grâce à la pureté de l'atmosphère.

17. **Réticule.** — Dans le plan même où se forme l'image réelle de l'astre fournie par l'objectif, on place un petit diaphragme percé d'une ouverture centrale. Le rôle de ce diaphragme est double. Il limite le champ de la lunette aux points dont les faisceaux lumineux arrivent à l'oculaire sous une faible obliquité; il sert de support à un réseau de fils très fins se croisant à angles droits. C'est à Huyghens qu'on doit d'avoir employé le diaphragme à la mesure du diamètre des astres. Quelques années plus tard, Malvasia, de Bologne, plaça sur le diaphragme un treillis de fils fixes. Auzout imagina de joindre aux fils fixes un fil mobile. On fait mouvoir ce fil mobile au moyen d'une vis, qui permet de le rapprocher des fils fixes jusqu'à la coïncidence ou de l'en écarter autant qu'on veut. Le réticule ainsi constitué peut alors servir aux observations micrométriques, c'est-à-dire à la mesure de petites distances angulaires. Un tel réticule, comprenant des fils fixes et des fils mobiles, est dit complet ou mixte.

Le réticule, tel qu'on le construit actuellement, comprend une première série de fils horizontaux fixes et mobiles, puis une seconde série de fils perpendiculaires aux premiers et situés les uns et les autres très approximativement dans le plan focal de l'objectif (plan du diaphragme); nous appellerons, par abréviation, fils verticaux les fils de front de la seconde série.

Le système des fils verticaux (appelés aussi *fils horaires*

ou *fils d'ascension droite*) comprend le plus souvent 9 à 11 fils fixes, à savoir : un fil vertical fixe situé dans le plan méridien, et des fils fixes parallèles à celui-ci, répartis symétriquement à droite et à gauche (fig. 19). Un fil vertical mobile est porté par un cadre ou chariot, qu'une vis micrométrique peut déplacer dans le sens horizontal, de sorte que ce fil mobile peut être amené en coïncidence avec chacun des fils fixes. Le pas de la vis équivaut généralement à 1′ environ. Un tambour divisé en 100 parties indique, par la lecture faite en regard d'un index fixe, les fractions de tour. Un second tambour, par un système simple de roues dentées (compteur de tours), donne le nombre de révolutions complètes effectuées par la vis pour aller d'une position à l'autre. Les fractions de tour s'évaluent à l'estime en dixièmes de division. Le fil mobile sert à la détermination des distances des fils fixes et à l'observation des astres dont le mouvement est très lent, les circompolaires. Il est bon que l'écrou de la vis ne fasse pas corps avec le cadre, afin d'éviter les temps morts. La vis s'appuie contre un des côtés du chariot ; un ressort antagoniste le maintient en contact avec la vis. Le réseau des fils horaires ne comprend quelquefois qu'un nombre pair de fils, huit ou dix par exemple ; il n'y a pas alors de fil

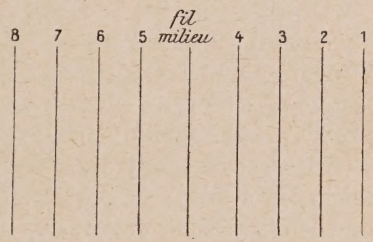


Fig. 19.

milieu. Les anciens observateurs n'employaient qu'un petit nombre de fils. Mayer, avec un Quart de cercle, observait à un ou deux fils, quoique son réticule en eût cinq. Lalande observait à trois fils.

Le système des fils horizontaux (appelés aussi *fils de déclinaison*) comprend un ou plusieurs fils fixes, un ou plusieurs fils mobiles; ces derniers sont souvent réunis par couples de deux situés à une distance de quelques secondes. Les couples extrêmes servent à la détermination des astres ayant un grand diamètre, comme le Soleil. Un système de deux tambours, analogue à celui des fils d'ascension droite, permet de mesurer le déplacement en déclinaison des fils mobiles.

Les fils tant d'ascension droite que de déclinaison doivent être rigoureusement parallèles et bien orientés. Le tube qui porte le diaphragme glisse à frottement dur dans le tube principal de la lunette, ce qui permet de rectifier l'orientation des fils et de les placer dans le plan focal. De son côté, le tube qui porte les lentilles de l'oculaire peut aussi glisser dans le tube porte-réticule, de façon qu'on puisse amener l'oculaire à la distance voulue des fils. Les tambours sont divisés sur la tranche qui est garnie d'un recouvrement en métal (en argent, le plus souvent) ou en celluloïd (système P. Gautier). Le celluloïd diffuse la lumière et ne donne pas de faux reflets comme le métal; les lectures sont alors beaucoup plus faciles. Le tambour est à frottement très dur sur la tige de la vis; il est facile d'en effectuer le réglage, c'est-à-dire de mettre le zéro en regard de l'index pour une position déterminée des fils. La partie extérieure de la tige de la vis porte deux molettes : l'une de petit diamètre (fig. 20) pour les dépla-

cements rapides, l'autre de grand diamètre pour les déplacements lents. On emploie quelquefois des vis à tête polygonale pour remplacer le molettage. Pour effectuer la lecture des tambours la nuit, l'observateur

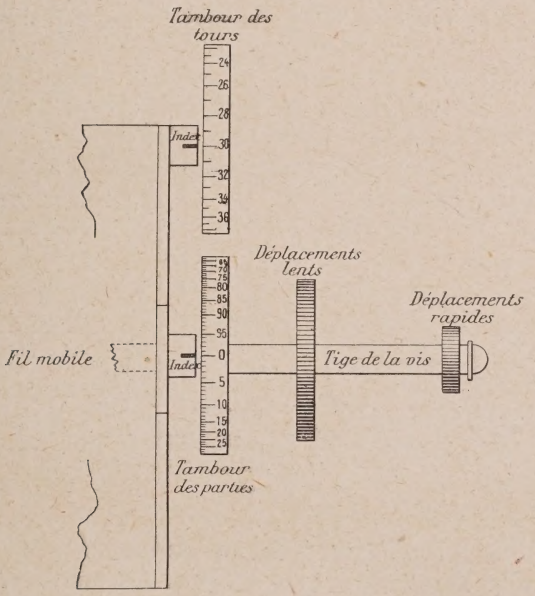


Fig. 20.

est obligé de placer à proximité une lampe, qu'il doit constamment déplacer. La lumière de cette lampe est souvent une gêne quand on doit observer des astres faibles. On a adopté, à l'Observatoire de Paris, un dispositif essentiellement pratique, qui consiste à éclairer les tambours tangentiellement (fig. 21) à l'aide de

petites lampes électriques (9 volts, 6 bougies) enfermées dans des tubes courbés à angle droit et fixés près des tambours. Un miroir à 45° renvoie la lumière sur le bord du tambour près de l'index. Les fils de lumière passent dans l'intérieur du tube de la lunette et dans le tourillon percé. Ils sont fixés à des anneaux

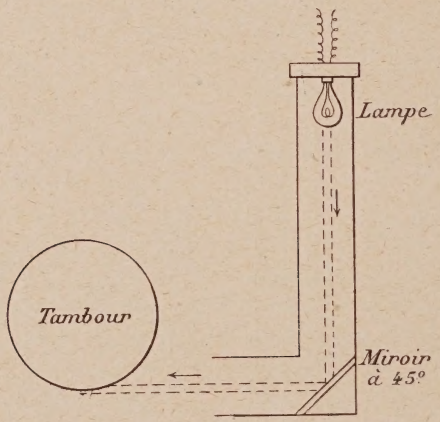


Fig. 21.

métalliques isolés, extérieurs au tourillon. Des contacts à ressort s'appuient sur ces anneaux. Les tambours sont ainsi très faciles à lire, et la lumière ne fatigue pas l'observateur. Le seul inconvénient de ce procédé, c'est de garder une source de chaleur près du tube, ce qui peut amener des déformations et avoir une influence sensible sur l'état de l'instrument.

La matière à employer pour les fils du réticule est de grande importance. Il s'agit d'obtenir des fils excessivement fins et cependant assez résistants pour qu'il

soit possible de les tendre de manière à avoir l'image parfaite d'une ligne droite. On a essayé successivement des cheveux, des fils de soie, des fils métalliques amincis à la filière. On emploie actuellement des fils de cocon d'araignée dont le diamètre est en moyenne de $0^{mm},005$ (5 microns), ou, à défaut de cocon, des fils d'une toile. Quelques constructeurs préfèrent ces derniers, parce qu'on peut se les procurer dans un très bon état de propreté en surprenant l'araignée au moment du tissage de la toile. L'emploi des fils métalliques, si fins qu'ils soient, est abandonné dans les réticules des lunettes méridiennes. Les fils sont placés, sur le cadre réticulaire, dans des rainures d'une extrême finesse, et on les y fixe à l'aide d'un mélange de résine et de cire ou avec de l'arcanson liquéfié. Malgré les précautions prises par le constructeur, il pénètre toujours un peu de poussière dans le tube instrumental; ces poussières s'attachent aux fils et gênent le jeu des fils mobiles au point de produire parfois la rupture. Pour nettoyer les fils, il suffit d'enlever légèrement les grains de poussière en les touchant avec un crin fixé à l'extrémité d'une petite tige. On doit, dans cette opération, opérer avec délicatesse; il est de toute nécessité de se servir d'une loupe. L'humidité a une tendance à détendre les fils qui, alors, se recroquevillent. Aussi doivent-ils être aussi tendus que le permet leur résistance à la traction. Les réticules à fils de cocon d'araignée peuvent avoir une durée de plusieurs années. Cependant nous avons constaté tout récemment qu'au bout d'un certain temps les fils peuvent se durcir et prendre des formes anormales, se courber, par exemple, en sens inverse de l'action de la pesanteur.

La verticalité des fils s'obtient en faisant coïncider le fil mobile vertical avec un point lumineux très éloigné. Lorsqu'on déplace la lunette, le point doit rester en coïncidence avec le fil ; l'horizontalité se règle en plaçant un fil horizontal sur une étoile équatoriale et s'assurant que l'étoile reste sur ce fil d'un bout à l'autre du champ. En général, les deux séries de fils sont rigoureusement perpendiculaires, et il suffit, pour bien orienter le micromètre, de régler la position d'un des fils. Lorsque le champ de l'instrument est très grand, on doit donner une grande longueur aux fils : la courbure des fils horizontaux peut alors devenir sensible. C'est un point sur lequel nous reviendrons.

On a fait l'essai en Amérique, il y a quelque vingt ans, de réticules tracés sur verre. Les résultats obtenus à Harvard College[1], à l'Observatoire Washburn[2], à Cincinnati[3] ont été très satisfaisants. Les traits remplis de plombagine sont, paraît-il, beaucoup plus fins que ceux de cocon d'araignée. Ce genre de réticule présente cependant deux graves inconvénients : il ne permet pas l'emploi du fil mobile et l'observation des étoiles faibles est difficile. En perfectionnant l'éclairage et en interposant un verre rouge donnant une illumination uniforme, on a pu, à l'Observatoire d'Harvard College, observer les étoiles faibles (11e grandeur) comme avec le réticule à fils. Il est bon de noter que l'emploi de ces réticules fait perdre environ une grandeur dans les conditions ordinaires d'observation.

[1] Pickering, *The Observatory,* vol. VII, p. 142; voir aussi Copeland, **2**, *Copernicus,* t. III, p. 133.

[2] Holden, **4**, *Publications of the Washburn Observatory of the University of Wisconsin,* vol. II, p. 35.

[3] Porter, *The sidereal Messenger,* vol. VIII, p. 3.

M. Vernon Boys[1] a inventé un procédé de fabrication de fils de quartz remarquables par leur finesse, la régularité de leur épaisseur et leur résistance à la rupture. D'après les expériences de M. Hutchins[2], un micromètre garni de fils de quartz ne laisse absolument rien à désirer. Telle est aussi l'opinion de M. Burnham[3]. Ces fils doivent être argentés : Brashear[4] a indiqué une méthode pratique d'argenture. La métallisation de ces fils peut d'ailleurs se faire sans augmenter leur diamètre d'une façon sensible.

Nous citerons encore les essais faits par M. Howe[5] d'un réticule en verre argenté sur lequel on a tracé des rainures très fines. Lorsque l'étoile passe derrière une de ces raies, il se produit une illumination instantanée, que l'observateur enregistre au chronographe. Ce réticule sombre a l'avantage de permettre l'observation des étoiles très faibles dans les mêmes conditions que l'observation des étoiles brillantes.

Examinons maintenant comment le micromètre permet d'évaluer la distance angulaire AOB de deux points par la mesure de la distance linéaire II′ de leurs images dans le plan focal F de l'objectif O (fig. 22). Appelons d la distance focale constante OF, β, β' les angles IOF, I′OF.

Les triangles rectangles FOI, FOI′ donnent :

$$IF = d \operatorname{tang} \beta, \quad I'F = d \operatorname{tang} \beta'.$$

[1] Boys, *Philosophical Magazine*, vol. XXIII, p. 489.
[2] Hutchins, *The sidereal Messenger*, vol. IX, p. 90.
[3] Wadsworth, 2, *Monthly Notices*, vol. LVII, p. 589.
[4] Brashear et Wadsworth, 1, *Silvered glass telescopes*. Voir *Astrophysical Journal*, vol. I, p. 252 ; voir aussi *English Mechanic and World of Science*, vol. XXXVII, p. 221 et p. 552.
[5] Howe, 1, *Monthly Notices*, vol. LXII, p. 580.

Les angles β et β' sont toujours très petits, et l'on peut les substituer à leurs tangentes. En retranchant alors les deux égalités précédentes, on a :

$$i = d(\beta' - \beta) = d\alpha,$$

d'où

$$\alpha = \frac{i}{d}.$$

La distance d étant constante, il en résulte que les

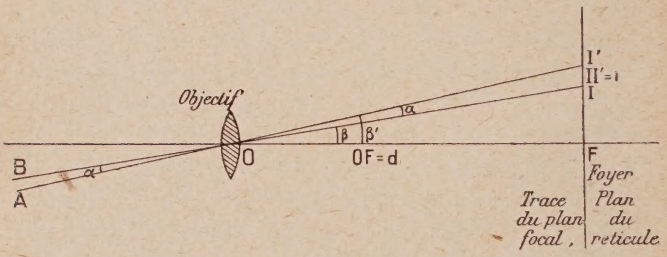


Fig. 22.

variations de l'angle α sont proportionnelles aux variations linéaires de II' ou i, distance des deux images.

18. **Tubes de la lunette. Axe de rotation. Piliers.** — Le dispositif le plus fréquemment employé comme monture de la lunette méridienne est le suivant : un cube métallique central creux C (fig. 13), sur quatre faces duquel sont boulonnés quatre cylindres ou troncs de cône allongés formant croix. L'objectif O et l'oculaire o sont fixés aux extrémités opposées de deux tubes, les deux autres se terminent par les tourillons T, T. Les deux tubes qui portent le système optique sont en laiton ou en fonte de fer. Le choix du métal a une importance

capitale au point de vue de la rigidité que doit présenter l'axe optique. M. Warner[1] s'est occupé spécialement du problème de la construction des grands réfracteurs; l'acier paraîtrait remplir le mieux les deux conditions essentielles du tube d'une lunette : la légèreté et la rigidité; l'aluminium ou les alliages d'aluminium manquent de rigidité. Le cercle méridien de 6 pouces de l'Observatoire naval des Etats-Unis est tout en acier. On donne souvent aux tubes une épaisseur décroissante du cube à la partie optique : tel est le cas du Grand Instrument méridien de l'Observatoire de Paris[2], où l'épaisseur décroît de 13 à 7 millimètres du cube à l'objectif ou à l'oculaire, c'est-à-dire de la grande base à la petite base. Nous devons faire remarquer ici que certains astronomes, entre autres Common, proposent d'augmenter la masse des instruments méridiens, sacrifiant la légèreté à la rigidité. On lira avec intérêt sur ce sujet le projet de cercle méridien de Common[3]. Nous ne pensons pas que ce projet ait été réalisé et nous ne croyons pas utile, si intéressant qu'il soit, de le décrire dans cet ouvrage. La substitution de l'acier au laiton a d'ailleurs été préconisée depuis longtemps par Yvon Villarceau[4]. Le savant astronome pensait que les déplacements de l'objectif peuvent avoir pour cause les différences des coefficients de dilatation des verres et du barillet dans lequel il est ajusté; les changements de température produisent des mouvements relatifs que le serrage de l'objectif empêche

[1] Warner, *Astronomy and Astro-Physics*, vol. XII, p. 695.

[2] Le Verrier, 6, *Annales de l'Observatoire de Paris* (Observations), t. XIX, p. 48.

[3] Common, *Monthly Notices*, vol. XLIV, p. 288.

[4] Yvon Villarceau, 5, *Annales de l'Observatoire de Paris* (Mémoires), t. IX, p. 15, note (**).

de se faire régulièrement. Il en résulte qu'à des températures égales, séparées par des variations un peu fortes, ne répondent pas toujours des positions identiques de l'objectif dans sa monture. Si telle est la cause de ces déplacements, on les éviterait en construisant la partie métallique en acier ou en fonte, substance dont le coefficient de dilatation diffère peu de celui du verre. On maintiendrait ainsi beaucoup mieux le foyer de l'objectif en coïncidence avec le plan du réticule.

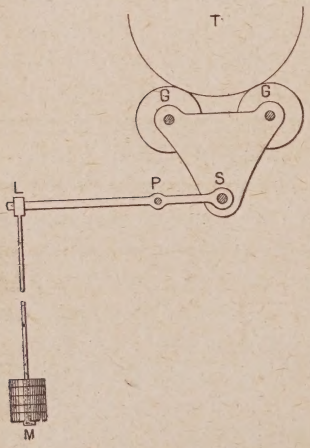


Fig. 23.

Pour diminuer le frottement des tourillons sur les coussinets, on place au-dessous des tourillons, entre les coussinets et la lunette, deux galets GG (fig. 23) supportés par une pièce métallique GGS articulée à l'extrémité d'un levier du premier genre SPL, et dont l'autre extrémité L supporte une tige verticale LM. La partie inférieure M est chargée de contrepoids formés de disques circulaires. Il est facile au constructeur de calculer les poids qu'il y a lieu de placer en M pour réduire le frottement de l'axe T sur son coussinet dans une proportion donnée. A l'Observatoire de Madras[1], la

[1] Pogson, *Results of observations of the fixed stars made with*

pression sur les coussinets du cercle méridien de Troughton et Simms est réduite à 10 ou 12 lbs. La pièce qui soutient le tourillon est montée de façon à pouvoir se dégager aisément, dispositif qui permet de soustraire T à l'action des contrepoids lorsqu'on veut soulever l'instrument pour le retourner, c'est-à-dire mettre le tourillon Est à l'Ouest et inversement. Il y a avantage à ce que la pièce GGS soit aussi rapprochée que possible du cube central; on diminue ainsi dans une notable proportion la flexion de l'axe horizontal de rotation. A l'Observatoire de Leyde, les tourillons sont tout près du tube portant les systèmes optiques.

Les tourillons sont généralement en acier trempé et reposent sur des coussinets en bronze. Il paraît y avoir avantage, au point de vue de l'usure des surfaces, à ne pas employer le même métal. On pourrait cependant, de l'avis de quelques constructeurs, faire les tourillons et les coussinets en acier trempé. Le frottement des surfaces est très atténué à l'aide d'huile fine qu'on doit changer au moins deux fois par an. Common a proposé d'enduire les surfaces frottantes de plombagine au lieu d'huile. M. Becker[1] préconise l'emploi de la vaseline, comme étant de beaucoup supérieur à celui de l'huile fine. D'après M. Holden[2], il serait nécessaire, au point de vue de la stabilité générale, de maintenir les tourillons en parfait contact avec les coussinets, en diminuant la masse des contrepoids.

L'un des tourillons est généralement évidé : nous ver-

the meridian circle at the Government Observatory, Madras, 1887, Introduction, p. xi.

[1] Becker, 2, *The Observatory*, vol. XXIV, p. 394.

[2] Holden, 2, *The sidereal Messenger*, vol. III, p. 199.

rons l'utilité de cette disposition quand nous parlerons de l'éclairage du champ. Les deux sont quelquefois percés longitudinalement. Les tourillons doivent être absolument cylindriques et de même diamètre, et il est nécessaire de s'assurer que ces conditions sont remplies. Il y a près de trois quarts de siècle que Taylor, à Madras, a proposé une méthode d'étude des tourillons à l'aide de microscopes micrométriques placés sur les piliers. On fait souvent usage des tourillons évidés pour cette étude ; quelquefois on emploie de préférence le niveau. Le Verrier, lors de l'installation du Grand Instrument méridien, a fait, avec un appareil à niveau très sensible, l'étude des tourillons de cet instrument alors qu'ils étaient encore sur le tour. Les inégalités étaient inférieures à $\frac{1}{600}$ de millimètre. Nous reviendrons sur ces points lors de l'étude de l'état de l'instrument.

Afin de faciliter la rectification de l'orientation de l'axe, l'un des coussinets BOB′ (fig. 24) n'est pas scellé directement sur le pilier. Il est formé d'une plaque métallique BB′ dont la face inférieure, plane et horizontale, repose sur une seconde plaque C′C taillée en coin. La face supérieure du coin est horizontale ; sa face inférieure est inclinée et repose sur une surface fixe de même inclinaison d'un second coin EE′ reposant sur le pilier. Une vis V, mobile dans l'écrou fixe F, s'appuie par son extrémité D sur le coin intermédiaire. Un ressort antagoniste maintient C′C en contact avec D. Ce dispositif permet de comprendre comment on peut relever ou abaisser le coussinet de manière à obtenir l'horizontalité de l'axe des tourillons. Une fois l'hori-

zontalité obtenue, on déplace la plaque EE′ par un dispositif semblable (vis W buttant en H), de manière à faire coïncider l'axe de rotation avec la ligne Est-Ouest.

La question de la stabilité d'un instrument méridien est, bien évidemment, de la plus haute importance. Or il suffit de jeter un coup d'œil sur la feuille d'un sismographe enregistreur pour se convaincre que le sol est presque constamment en état de vibration : l'action du vent dans les arbres, sur les murs des constructions suffit pour

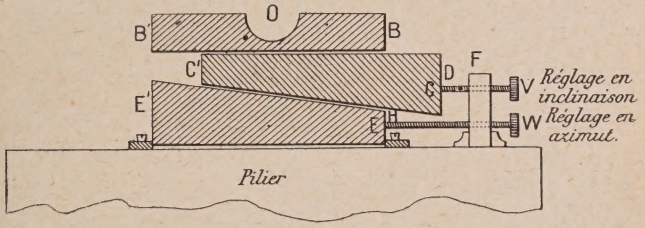


Fig. 24.

faire vibrer la couche supérieure du sol. L'astronome doit donc s'entourer de toutes les garanties de stabilité dans le choix de l'emplacement et dans la construction des piliers. Ceux-ci doivent être en pierre dure ; le marbre ne paraît pas avantageux. Le Cercle méridien de Strasbourg, construit par M. Repsold, d'après les plans du professeur Winnecke, repose sur des piliers métalliques : l'équilibre de température s'établit avec plus de rapidité et de régularité. Le pilier doit se composer de monolithes superposés, leurs faces d'appui placées bien horizontalement afin d'éviter la plus légère tendance au glissement. Quant au sol de fondation, les avis des observateurs sont très partagés. Le Grand Instrument

méridien de l'Observatoire de Paris présente une stabilité remarquable; ses piliers reposent sur un vieux mur de soutènement des terrasses de l'Observatoire et dont la construction remonte à plus de deux siècles. On a constaté au Cap de Bonne-Espérance que la position du cercle méridien semble influencée par l'état des eaux dans les rivières qui entourent la colline sur laquelle est bâti l'Observatoire. Un sol formé d'une couche de sable fin, d'après des opinions reçues, est l'un des meilleurs comme sol de fondation. Cependant le cercle méridien de l'Observatoire Washburn, dont les piliers reposent sur le sable, ne présente pas une stabilité entièrement satisfaisante. Le rocher, selon M. Newcomb, peut être préféré au sable, à condition que le roc soit protégé par une épaisseur suffisante de terre ou de sable contre les variations de température. L'étude géologique du terrain sur lequel on veut installer un instrument est capitale, des sols paraissant fixes éprouvant parfois des glissements sensibles. Nous citerons le fait, constaté par le docteur Hirsch, à l'Observatoire de Neuchâtel, du glissement continu et très sensible de la couche calcaire. A Edimbourg, on pensait que la colline de grès rouge sur laquelle est bâti l'Observatoire éprouvait des soulèvements et des abaissements périodiques. A Greenwich, deux instruments voisins ont éprouvé, d'après Ellis, des variations en sens contraire, qui ne peuvent évidemment pas s'expliquer par les mouvements du terrain. Le Cercle méridien du jardin de l'Observatoire de Paris a subi pendant longtemps un fléchissement continu d'un des piliers ; des travaux de consolidation des fondations ont atténué ce déplacement sans le supprimer. A l'Observatoire de Poulkovo,

Peters et Struve ont fait remplacer les piliers de granit par des massifs de brique et de ciment, d'ailleurs sans grand bénéfice. Cependant, dans l'installation des cercles Repsold, on donne la préférence aux piliers de brique. M. Hough[1] est d'avis, au contraire, que les piliers de pierre sont préférables. La stabilité de l'instrument méridien de l'Observatoire Dearborn a été augmentée par la substitution de piliers de grès aux massifs de brique. Le fait contraire a été constaté pour la Lunette méridienne de Washington[2]; mais il est possible que l'instabilité ait eu pour cause non le déplacement du pilier proprement dit, mais celui des fondations d'une part, et celui des scellements des coussinets d'autre part.

A l'Observatoire naval des États-Unis[3], on a dû, lors de la réorganisation, remédier aux défauts du Cercle méridien, défauts qui tenaient en partie à l'emploi des piliers de marbre, à cause de leurs dilatations irrégulières. Il est toujours mauvais d'associer les métaux à la maçonnerie, à cause des différences de dilatation. Cependant la combinaison de la pierre et de la fonte est, de toutes, la moins hétérogène : le tableau suivant permet d'en juger :

[1] Hough, 2, *Astr. Nach.*, vol. CLXIII, col. 209.
[2] Updegraff, 2, *Astr. Nach.*, vol. CLXIV, col. 361.
[3] Davis, *Rapport annuel du directeur de l'Observatoire naval des États-Unis*, 1902, p. 3.

MATIÈRES	COEFFICIENTS DE DILATATION
Fer	0,000012
Fonte	0,000011
Laiton et bronze	0,000019
Granit	0,000009
Pierre (grès)	0,000010 à 0,000012
Brique	0,000005
Marbre	0,000004 à 0,000008
Ciment et plâtre	0,000014

M. Hough a fait une étude comparative des variations mensuelles pour une série d'instruments des grands observatoires ; il a pu baser ses conclusions sur des faits précis et bien analysés, ce qui leur donne une grande valeur qu'une longue pratique des instruments vient encore augmenter. Ces détails, sur lesquels nous avons tenu à insister, sont de toute première importance.

19. **Éclairage du champ et des fils.** — Lorsqu'on observe dans le jour, les fils du réticule paraissent noirs sur le fond azuré du ciel, et il est facile de repérer la position de l'astre. La nuit il est nécessaire d'éclairer le champ pour rendre les fils visibles. L'éclairage doit pouvoir être gradué afin que l'objet à observer reste nettement visible.

Dans les instruments méridiens, l'éclairage du champ se fait par le tourillon creux dans l'axe duquel on a placé une source lumineuse. Un tube muni de deux lentilles concentre la lumière dans la direction de l'axe. Un petit réflecteur plan, incliné à 45° et situé sur l'axe optique de la lunette, reçoit les rayons de lumière

qu'il renvoie sur le réticule. L'observateur règle la quantité de lumière qui pénètre dans le tourillon creux à l'aide d'une manette qu'il peut faire mouvoir tout en maintenant l'œil à l'oculaire.

Parmi les nombreux dispositifs employés, nous citerons la fenêtre dite « œil-de-chat », qui est formée de deux volets mobiles V,V', perpendiculaires à l'axe de rotation et placés entre le tourillon et la lampe. Ces volets (fig. 25) sont échancrés en forme d'angle ; lorsqu'on les déplace dans le sens des flèches, la surface ouverte du losange O diminue, et la quantité de lumière qui pénètre dans l'instrument diminue proportionnellement.

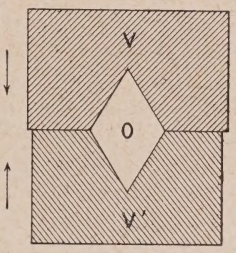


Fig. 25.

On peut encore, dans le même but, employer un diaphragme à réseau placé sur le passage des rayons lumineux, à l'intérieur de l'axe de rotation de la lunette. Pour avoir le maximum d'éclairement, on place la toile normalement à la direction de la lumière. Lorsque la toile est placée parallèlement à l'axe du tourillon, c'est la monture des diaphragmes qui intercepte la lumière.

On peut employer comme source lumineuse la flamme d'une lampe ou celle d'un bec de gaz; mais l'emploi d'une lampe électrique à incandescence est préférable, l'échauffement étant bien plus faible. Il est important que la partie brillante de la flamme soit sur l'axe du tourillon creux et que le prisme ou le miroir soit bien orienté, afin que tout le champ soit illuminé uniformément.

L'éclairage du champ a l'inconvénient de diminuer l'éclat apparent de l'astre, et à la limite de visibilité des fils, il y a encore assez de lumière pour faire disparaître des étoiles qu'on aurait pu distinguer sur le fond noir du ciel. Pour parer à cet inconvénient, on laisse le champ obscur et on éclaire faiblement les fils du côté de l'oculaire. De nombreux dispositifs permettent d'obtenir des fils brillants sur fond noir. Voici celui du Grand Instrument méridien de l'Observatoire de Paris, instrument construit spécialement pour l'observation des petites planètes. Dans l'intérieur du cube se trouve un cercle évidé en couronne, portant quatre prismes à réflexion formant les sommets d'un carré. Une tige placée près de l'oculaire passe à frottement dans un tube fixé perpendiculairement à la plaque qui ferme le tube porte-oculaire. Cette tige est attachée par son autre extrémité à l'anneau; elle permet d'amener le plan de l'anneau à être perpendiculaire à l'axe optique, l'un des diamètres de l'anneau étant horizontal. On fixe la tringle à l'aide d'une vis de pression. Lorsque le plan de l'anneau est ainsi placé, le réflecteur d'éclairage du champ ne reçoit plus de lumière. Les rayons lumineux issus de la source L (fig. 26) se réfléchissent sur les prismes de la couronne en P parallèlement à l'axe optique. Une série de prismes P′ reçoivent ces rayons réfléchis une première fois et les renvoient sur les fils F. La face hypoténuse de ces seconds réflecteurs fait avec celle des premiers un angle un peu plus grand que 90°; il en résulte que le rayon lumineux vient raser le bord du fil, côté de l'oculaire. Deux prismes de la couronne et les deux prismes correspondants du micromètre éclairent les fils verticaux; les deux autres couples illuminent les

fils horizontaux. En faisant varier, à l'aide de l'ouverture de l'œil-de-chat, la quantité de lumière qui pénètre dans le cube, on a des fils plus ou moins brillants. Avec les fils éclairés sur fond sombre, il est souvent nécessaire de mettre l'œil à l'abri de toute lumière;

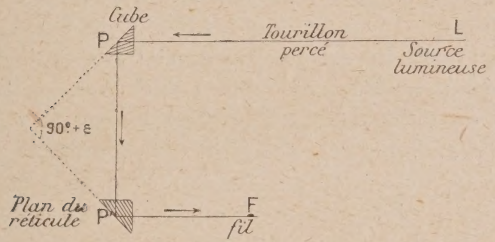


Fig. 26.

l'observateur est même parfois obligé de se voiler complètement la tête.

Les fils de quartz permettent d'obtenir une illumination parfaite et uniforme. Il suffit pour cela de placer parallèlement au fil un miroir cylindrique, en arrière du fil, du côté opposé à la source lumineuse.

20. **Mise au point.** — Le réticule doit être rigoureusement dans le plan focal de l'objectif. Une mise au foyer défectueuse est une source d'erreurs : elle dilate le diamètre apparent des astres et fausse les pointés. Le tube qui porte le réticule peut glisser dans le tube principal : il est donc facile de rectifier la mise au foyer. Pour s'assurer que la mise au foyer est exacte, l'observateur commence par mettre l'oculaire au point sur les fils, en faisant glisser le tube porte-oculaire, suivant sa vue, jusqu'à ce que les fils

paraissent aussi nets que possible. Après quelques tâtonnements, on se rend aisément et rapidement compte de la position à donner à l'oculaire. Outre le mouvement de tirage pour les grands déplacements, on adapte au système oculaire un dispositif à vis de très petit pas, qui permet, après un réglage approché, d'obtenir la meilleure mise au point sur les fils. Cela fait, on vise avec la lunette un astre ou un objet terrestre très éloigné, bien net, et, sans toucher à l'oculaire, on déplace le tube du réticule jusqu'à ce que l'image soit vue avec la plus grande netteté. S'il s'agit d'une étoile, le disque devra paraître comme un simple disque brillant, aussi petit que possible et bien défini. Ces deux opérations effectuées, on doit voir nettement les images de l'astre et des fils. Mais les deux opérations peuvent être faites avec des adaptations différentes de l'œil, et il est nécessaire de les vérifier. Pour cela on déplace la lunette en hauteur de manière à amener l'étoile sur l'un des fils horizontaux, puis on déplace l'œil suivant une droite perpendiculaire au fil, en l'élevant et en l'abaissant. Si la mise au foyer est bonne, l'étoile restera en coïncidence avec le fil. Si, au contraire, l'étoile quitte le fil en même temps que l'œil se déplace, il y a *parallaxe* (παραλάττω, je transpose) *des fils*, ceux-ci n'étant plus dans le plan de l'image focale. Le sens du déplacement indique le sens dans lequel on doit agir sur le réticule. Dans la figure 27, 1° le fil *f* et l'image *m* sont en coïncidence ; dans le 2°, l'étoile *m* est en avant de *f* ; quand l'œil s'élève, *f* paraît au-dessus de l'astre *m* ; il paraît au-dessous quand l'œil s'abaisse ; dans le 3°, les déplacements relatifs sont inverses de ceux du deuxième cas. Pour rendre l'opération de la mise au

point plus précise, on munit le tube qui porte le réticule d'un pas de vis. Un collier porte un filetage de même pas. En agissant sur ce collier, à l'aide de poignées situées sur son pourtour, on peut, par une rotation convenable, déplacer le réticule perpendiculairement à l'axe optique. Le déplacement qu'il convient d'effectuer est toujours très petit; il y a lieu cependant, après chaque mise au foyer, de régler l'orientation des fils. Le collier fileté porte une graduation sur sa circonférence. Un

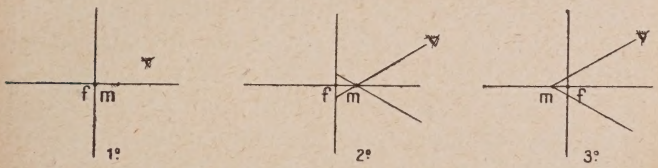


Fig. 27.

index fixé sur le tube de la lunette permet de relever la fraction de tour à laquelle correspond une détermination de mise au point. On répète l'opération plusieurs fois; il y a même avantage évident à la faire exécuter par divers observateurs. On fixe finalement le collier à la position moyenne des lectures obtenues.

On peut aussi procéder à la mise au foyer par l'observation du nadir, en regardant l'image des fils sur la surface réfléchissante d'un bain de mercure : ces images doivent être aussi nettes et aussi fines que possible. Nous indiquerons plus loin comment se fait l'observation du nadir. Ce procédé de mise au point est loin d'être aussi précis que celui de la méthode précédente. Des expériences effectuées au Grand Instrument méridien de

l'Observatoire de Paris, par MM. Oltramare, Lancelin et Chatelu [1], à l'aide des deux méthodes, ont donné des différences assez sensibles. Ces discordances systématiques devaient, d'après les observateurs, tenir à l'imperfection du système optique qui intervient dans l'observation du nadir. MM. Perchot et Ebert, dans l'étude du miroir zénithal dont nous parlerons plus loin, sont, en effet, arrivés à supprimer des divergences analogues par un réglage convenable de l'éclairage. Pour vérifier la mise au foyer par les étoiles, les observateurs du Grand Instrument méridien plaçaient sur l'objectif un diaphragme muni de deux ouvertures circulaires aussi distantes que possible. L'image de l'astre est dédoublée si le réticule n'est pas dans le plan focal. Pratiquement, la lunette était dirigée sur une circompolaire, à cause de la lenteur du mouvement de ces étoiles ; une série de mises au foyer étant effectuée et le micromètre étant placé à la position moyenne, ils vérifiaient la coïncidence des images.

M. Salet [2] a fait une étude des erreurs dues à la parallaxe des fils. Ces erreurs, provenant des différences de position de l'œil par rapport au centre de l'anneau oculaire, peuvent affecter les pointés de déclinaison, quel que soit le soin que l'on ait apporté à la mise au foyer; mais elles ne peuvent pas dépasser une certaine limite imposée par le fait que les rayons lumineux doivent toujours pénétrer dans l'œil : on les éviterait en faisant coïncider l'œilleton et l'anneau oculaire.

[1] Oltramare, Lancelin et Chatelu, **1**, *Annales de l'Observatoire de Paris* (Observations de 1897), p. B. 5.

[2] Salet, **1**, *Bulletin astronomique*, t. XXI, p. 83.

CHAPITRE II

LA MESURE DU TEMPS

21. **L'horloge sidérale.** — L'unité de temps adoptée par les astronomes, dans la pratique des observations méridiennes, est le jour sidéral.

La pendule sidérale, ou pendule astronomique, donne le temps sidéral. Le cadran est divisé en 12 (ou 24) parties pour les heures, en 60 parties pour les subdivisions de l'heure. Sur ce cadran se meuvent trois aiguilles (heures, minutes et secondes), les deux premières sur l'axe central, la troisième (celle des secondes) sur ce même axe ou sur un axe différent. Dans ce dernier cas, l'aiguille des secondes est placée en regard d'une seconde graduation circulaire de 60 parties.

Les pendules astronomiques doivent être des horloges de haute précision ; le rouage doit se borner aux parties rigoureusement essentielles sans accessoires (sonneries, indications du quantième, etc.) qui puissent causer des résistances accidentelles. Dans les régulateurs chargés de synchroniser d'autres pendules, on supprime même les aiguilles lorsque ces régulateurs ne sont pas destinés à être observés directement.

Il n'entre pas dans le cadre de cet ouvrage de

décrire le système de rouage qui constitue une pendule. Nous rappellerons seulement que la pendule se compose :

1° du *moteur* (poids ou ressort) destiné à donner le mouvement à un système de roues ou mobiles reliés par des pignons (le rouage); les aiguilles sont portées à frottement dur sur les axes de certaines roues ;

2° du *régulateur*, pendule ou balancier battant la seconde sidérale ;

3° de *l'échappement*, qui met le mouvement du rouage sous la dépendance du régulateur, en même temps que, par l'intermédiaire du rouage et de l'échappement, le moteur entretient le mouvement d'oscillation du pendule et la constance de l'amplitude.

La lecture de l'heure, si simple soit-elle, exige de l'observateur une certaine attention, surtout dans les observations de passage faites à l'œil et à l'oreille. Les erreurs de cinq divisions ou d'une division, minutes ou secondes, sont plus fréquentes qu'on ne le supposerait tout d'abord. Elles s'expliquent d'ailleurs par les multiples opérations que l'astronome a à effectuer simultanément.

22. **Le moteur.** — On préfère, comme moteur, le poids agissant à l'extrémité d'une corde à boyau enroulée sur un cylindre. L'Observatoire de Paris possède actuellement trois pendules sidérales principales : l'une de Winnerl, la deuxième de M. A. Fénon et la dernière de M. Ch. Joseph; toutes trois sont mues par un poids. Le remontage se fait tous les quinze jours quoique la durée de marche soit d'un mois.

Le P. Schreiber[1] a signalé, en 1899, une particularité

[1] Schreiber, *Astr. Nach.*, vol. CXLVII, col. 353.

remarquable de la marche d'une pendule de Cooke dont les variations périodiques semblaient fonction de la position relative du poids moteur et de la lentille oscillante. Cette cause perturbatrice avait d'ailleurs été déjà indiquée par Bohnenberger. On peut l'éliminer en faisant descendre le poids dans un tube. Il semblerait donc que la variation de marche avait pour cause la compression périodique de l'air. Le P. Schreiber voit dans ce fait un procédé de réglage des pendules. Il suffirait de placer près de la lentille un obstacle. La question présente un grand intérêt, comme toutes celles qui peuvent jouer un rôle dans l'étude si difficile et si délicate des variations de marche des horloges, mais elle n'est pas encore suffisamment étudiée.

23. **L'échappement.** — On emploie indifféremment dans la pendule astronomique l'échappement de Graham ou l'échappement de Reid. La pendule Ch. Joseph, citée plus haut (§ 22), a un échappement de Graham ; les pendules Winnerl et Fénon, l'échappement de Reid. A l'Observatoire d'Uccle (Bruxelles), la pendule fondamentale d'Howhü possède l'échappement de Graham. L'échappement à force constante de Reid est d'une grande délicatesse, mais il a l'avantage de donner au balancier une impulsion toujours égale et de pouvoir marcher sans qu'on soit obligé de lubréfier les surfaces. L'étude comparative que nous avons poursuivie pendant plusieurs années des deux pendules Fénon et Joseph ne nous a pas permis cependant de mettre en évidence absolue la supériorité d'un système sur l'autre. Le système de Graham, de beaucoup le plus ancien, a donné de nombreuses preuves de ses qualités. Les

observations méridiennes de Bradley (1750 à 1762), qui sont la base de l'astronomie moderne, ont été faites avec une pendule sidérale construite par Shelton, sous la direction de Graham. Ce système a toujours été employé depuis avec succès; il est certainement moins sujet à se déranger que le système Reid.

Plus récemment, M. Riefler[1] a imaginé une modification de l'échappement Graham et de la suspension à couteau et à ressort. Dans l'échappement Riefler le pendule est libre. L'impulsion est transmise au balancier par le ressort de suspension, au moment du passage du pendule par la verticale. Il résulte de ce dispositif que les inégalités du rouage influent très peu sur l'isochronisme des oscillations, l'impulsion se faisant au moment où le pendule possède le maximum de force vive. Par suite de l'absence de frottement, on peut employer un poids moteur faible. M. Anding[2] a étudié, à l'Observatoire de Munich, une horloge Riefler; les résultats obtenus ont été très bons. L'Observatoire d'Uccle (Bruxelles)[3] a actuellement en service trois pendules fondamentales Riefle à réchappement libre, et de nombreux observatoires ont adopté ce système.

24. **Le régulateur.** — Il est impossible d'avoir une pendule dont la marche soit régulière si le pendule régulateur n'est pas soustrait aux actions perturbatrices résultant des variations de température et de pres-

[1] Riefler, 1, *Die Präzisions-Uhren mit vollkommen freiem Echappement und neuem Quecksilber-Compensationspendel.* Voir aussi *Astr. Nach.*, vol. CXXXIV, col. 217.

[2] Anding, *Astr. Nach.*, vol. CXXXIII, col. 217.

[3] Delporte, *Installation des pendules à l'Observatoire royal de Belgique*, Annuaire pour 1907.

sion. On peut y parvenir soit en corrigeant par un dispositif spécial les effets de ces variations, soit en soustrayant le balancier à leur influence.

Les systèmes les plus employés actuellement pour corriger le pendule de l'effet des variations de température sont ceux de Graham, à éprouvettes de mercure, et ceux de Leroy et d'Harrisson (pendules à gril), à tiges de fer et de cuivre. Le système de Reid, acier et zinc, et celui d'Henri Robert, zinc et platine, sont à peu près abandonnés. Nous citerons encore les lames compensatrices de Martin, système de deux tiges métalliques de nature différente, soudées dans leur longueur et fixées transversalement à la tige dans le plan d'oscillation. Ces procédés sont décrits dans les ouvrages de physique. Le défaut commun de tous ces systèmes est évident : la masse métallique ne se met pas assez rapidement en équilibre de température. M. Buckney[1] a constaté qu'il faut deux ou trois jours pour que le récipient de l'éprouvette Graham arrive à une température stable après une variation de 30°. Plus la masse du récipient est considérable, plus il faut de temps. Le refroidissement et l'échauffement se font d'ailleurs d'une manière très différente. Les systèmes de compensation où le zinc joue un rôle ne sont pas à l'abri de critique. M. Comstock[2], de l'U. S. Lake Survey, a montré, en effet, que le zinc échauffé ne reprend pas, après le refroidissement, sa longueur initiale. L'emploi d'un pendule à tige de bois de sapin verni présente un autre inconvénient : le vernis ne met pas le bois complètement à l'abri des variations hygrométriques. Enfin, ainsi que l'a montré M. Bakhuy-

[1] Buckney, *The Observatory*, vol. IX, p. 218.
[2] Comstock, *The Observatory*, vol. IX, p. 220.

zen en plaçant des thermomètres très sensibles en différents points de la cage de la pendule[1], il peut exister des différences d'un demi-degré entre le haut et le bas de la cage, ce qui rend insuffisant le système compensateur. Suivant le conseil de M. Riefler, on a alors remplacé la tige de suspension du balancier par une tige creuse remplie de mercure, qui prend rapidement la température la plus élevée, d'où amélioration sensible des résultats. Cela nous semble encore insuffisant, comme correction de l'influence perturbatrice, dans une pendule de haute précision.

Les études faites par M. Guillaume sur la dilatation des aciers au nickel ont montré que ces aciers éprouvent de faibles dilatations et qu'ils sont éminemment propres à la construction des tiges de pendule. L'acier à 36 % de nickel (dit *métal invar*) a pour coefficient de dilatation : $0{,}9 \times 10^{-6}$; celui du platine est dix fois plus fort : 9×10^{-6}. Aussi l'emploi de ce métal tend-il à se généraliser. Les essais qui ont été faits à l'Institut géodésique de Prusse ont été des plus concluants, et il semble qu'à l'heure actuelle c'est aux balanciers en métal invar qu'on doit donner la préférence comme procédé de compensation des changements de température[2]. Les expériences faites à Nice sur deux pendules en acier-nickel, avec entretien électrique de M. Lippmann, ont donné les meilleurs résultats[3].

En réalité, il n'existe pas de moyen parfait d'obtenir

[1] Picart, *Bull. astr.*, t. XX, p. 457.

[2] Riefler, 2, *Präzisions-Pendeluhren und Zeitdienstanlagen für Sternwarten*, p. 16.

[3] Mascart, 1, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. CXXXIX, p. 1026.

la compensation des variations thermométriques. Aussi dans les grands observatoires s'efforce-t-on de maintenir les horloges à une température constante. L'installation dans les caves est alors tout indiquée, mais elle exige quelques précautions, afin de préserver le rouage de la grande humidité. Nous dirons plus loin comment se fait la transmission électrique de l'heure. Nous croyons utile d'insister sur les conditions d'installation. La pendule sidérale Winnerl de l'Observatoire de Paris était installée autrefois dans les anciennes carrières qui se trouvent à 27 mètres au-dessous du sol. La température 11°,8 de ces galeries est absolument constante; les variations sont certainement inférieures à 0°,02, comme le prouvent les observations suivies d'un thermomètre à acide sulfureux. A l'Observatoire royal de Belgique[1], où l'installation des pendules doit être regardée comme un modèle parfait, les horloges sont situées dans une cave, à 3 mètres au-dessous du niveau du sol. Les murs sont doubles; on les a garantis contre l'humidité par des revêtements en bitume, de manière à obtenir une étanchéité complète. L'air extérieur circule entre les doubles murs. Pour empêcher les variations de température de se transmettre à la salle des pendules, on a recouvert les murs de briques de liège (30 centimètres) aggloméré au goudron. Autour des parois de la salle, on a établi un système de circulation d'eau dont la marche est automatique. Un thermomètre électrique commande un interrupteur à mercure. Celui-ci établit ou coupe le courant à la dynamo qui actionne la pompe. Cet interrupteur règle en même temps l'allumage de lampes à

[1] Delporte, *Installation des pendules à l'Observatoire royal de Belgique*, Annuaire pour 1907.

incandescence placées sous les conduites d'eau. L'eau échauffée ramène l'air de la salle à la température adoptée. Dès que la cave est à cette température, la circulation cesse et les lampes s'éteignent. L'expérience a montré que les variations ne peuvent pas dépasser quelques dixièmes de degré. A l'Observatoire du Cap de Bonne-Espérance, la constance de la température autour de l'horloge sidérale est assurée à $0^{\circ},1$ près. Les pendules de l'Observatoire de Bonn sont dans une salle à température constante. Nous ne multiplierons pas ces exemples.

En principe, il est toujours plus avantageux de supprimer les causes perturbatrices que de corriger les observations des effets qu'elles peuvent produire. Il est évident que, non seulement à cause de son action sur la longueur du pendule, mais aussi sur les divers organes du rouage, on doit soustraire la pendule aux variations de température. Nous ne pensons pas cependant qu'il soit nécessaire de maintenir l'horloge sidérale à une température rigoureusement constante. La marche de l'horloge sera bonne si les changements de température sont faibles et lents, auquel cas le pendule compensateur se met normalement en équilibre de température. C'est d'après ces considérations que la pendule Winnerl de l'Observatoire de Paris a été placée dans une chambre isolée, construite en briques de liège et située au rez-de-chaussée Nord-Est du bâtiment principal. Les variations de température y sont très régulières.

Ce que nous avons dit pour les changements de température s'applique évidemment aux variations de pression barométrique, c'est-à-dire qu'on doit agir par compensation ou par suppression de la cause troublante.

Dans le cas qui nous occupe actuellement, la forme de la masse pesante du régulateur joue un rôle, et la constante pneumatique peut varier de $0^s,012$ à $0^s,018$; c'est-à-dire que la pendule peut éprouver un retard de $0^s,012$ à $0^s,018$ lorsque la pression barométrique augmente de 1 millimètre en une journée. Il existe de nombreux systèmes de compensation : nous ne croyons pas qu'il y en ait de parfait. Nous citerons comme un des meilleurs le système à baromètre anéroïde de construction spéciale, en relation avec le pendule[1], système Rédier. On fait aussi usage du pendule à baromètre compensateur à siphon de Robinson.

Le moyen le plus sûr est de soustraire le pendule à l'influence des variations de pression en l'enfermant dans une cage hermétiquement close, et cette opinion est celle de M. Newcomb dont l'autorité en pareille matière n'est pas contestée. A l'Observatoire naval des Etats-Unis[2], la pendule sidérale d'Howard est installée dans une cage avec un vide partiel. Cette condition est aussi réalisée avec la pendule électrique de M. Hipp[3], enfermée dans un cylindre de verre où l'on fait le vide. M. Riefler construit des pendules astronomiques sous cylindre, à pression constante. En faisant varier la pression, on peut annuler la variation de marche de la pendule; une Table indique la correspondance des variations diurnes de marche et des changements de pression baro-

[1] Riefler, 2, *Präzisions-Pendeluhren...*, p. 21.

[2] Davis, *Rapport annuel du Directeur de l'Observatoire naval des États-Unis*, 1902, p. 4.

[3] Hirsch, *Bulletin de la Société des Sciences naturelles de Neuchâtel*, t. XIV, p. 3 et p. 347; voir aussi *Bull. astr.*, t. II, p. 129.

métrique. Depuis 1882, l'Observatoire de Berlin [1] possède une pendule installée dans un espace hermétiquement clos. Les résultats obtenus sont excellents. On n'a constaté au manomètre qu'une diminution lente de pression de $1^{mm},2$ par an. La marche diurne ne s'est jamais écartée de plus de $0^{s},03$ de sa valeur moyenne [2]. La moyenne des écarts est de $0^{s},015$; elle se réduirait à $0^{s},01$ en tenant compte des variations de température. De nombreux observatoires ont adopté le système Riefler : nous citerons ceux d'Uccle, de Philadelphie, de Georgetown College. M. Charles S. Howe [3] a constaté que la marche diurne de cette dernière pendule, pendant une période de quatre mois, avait oscillé entre les limites très restreintes $0^{s},015$ à $0^{s},022$.

La marche d'une pendule peut, en définitive, être représentée par une fonction de la forme

$$\mu = m + n\ (t - t_0) + p\ (\theta - \theta_0) + q\ (h - h_m),$$

dans laquelle m, n, p, q sont des coefficients, t le nombre de jours comptés à partir de t_0, θ la température et θ_0 une température fixe voisine de la moyenne, h et h_m la pression barométrique et une pression barométrique voisine de la moyenne. Pour donner une idée de la valeur des coefficients, nous rappellerons que l'étude d'une pendule d'Howhü à Leyde, pendant la période 1865 déc. 1 à 1867 oct. 25, a conduit à la valeur

$$\mu = +0^{s},759 - 0^{s},03642\ (\theta - 14^{\circ}) + 0^{s},0106\,(h - 760^{mm})$$

[1] Foerster, **2**, *Vierteljahrsschrift der astronomischen Gesellschaft*, 1886, p. 83; voir aussi *The sidereal Messenger*, vol. III, p. 206.

[2] Küstner, **1**, *Astr. Nach.*, vol. CXIV, col. 391.

[3] Howe, **2**, *The astronomical Journal*, vol. XXII, p. 159.

pour la variation de la marche diurne[1]. M. Hilfiker[2] a appliqué la formule précédente à l'étude, par comparaison avec la pendule de Hipp, d'une pendule de Winnerl (pendule compensateur à gril) installée depuis vingt-cinq ans à l'Observatoire de Neuchâtel. Il a déterminé les coefficients à l'aide d'un grand nombre d'équations. Les conclusions de ce travail sont des plus intéressantes. Le coefficient n dépend de l'état des huiles et ne devient constant que quelques mois après le renouvellement. Dans l'étude d'une pendule Dent, à l'Observatoire de Hongkong, M. Doberck[3] avait introduit dans la formule un terme en t^2 qui a disparu après un changement des huiles. Quant au coefficient thermométrique p de la pendule de Neuchâtel, il est resté à peu près constant et égal à $-0^s,025$. La valeur du coefficient barométrique est en moyenne de $+0^s,010$, valeur un peu inférieure à celles trouvées pour des pendules système Graham : $0^s,012$ (Hirsch), $0^s,015$ (Wolfer), $0^s,012$ (Holden). Ces résultats, quoique particuliers à la pendule Winnerl de Neuchâtel, ont cependant un intérêt général. En les comparant aux résultats obtenus dans différents observatoires, on verra que le coefficient barométrique est assez constant.

[1] Newcomb, **2**, *The sidereal Messenger*, vol. III, p. 206.
[2] Hilfiker, **1**, *Astr. Nach.*, vol. CXIV, col. 391.
[3] Doberck, *The Observatory*, vol. XVIII, p. 297; voir aussi *Astr. Nach.*, vol. CXX, col. 183, et vol. CXXV, col. 359.

OBSERVATOIRES	MODE DE COMPENSATION	COEFFICIENT BAROMÉTRIQUE
Neuchâtel	Pendule à gril	$0^s,010$
Neuchâtel	Pendule électrique Hipp	0 ,012
Poulkovo	Pendule à mercure	0 ,013
Leyde	id.	0 ,015
Berlin	id.	0 ,015
Zurich	id.	0 ,015
Madison	id.	0 ,012
	Moyenne :	0 ,013

Tisserand [1] a déterminé la constante barométrique de la pendule Winnerl de l'Observatoire de Paris en discutant des séries d'observations que nous avions effectuées [2] en 1894 et en 1895 au Grand Instrument méridien. Cette pendule étant à température constante et son régime normal bien établi, sa marche pouvait se représenter par la formule très simple

$$\mu = m + q\ (h - h_m).$$

La comparaison des valeurs de μ, dans l'intervalle $t_1 - t_o$, déduites de nos observations, à celles de la pression barométrique moyenne calculée par la formule

$$\varpi = \frac{\int_{t_o}^{t_1} h dt}{t_1 - t_o},$$

a mis en évidence la correspondance des valeurs de μ et de ϖ. La marche μ est bien représentée par la formule

$$\mu = 0^s,019 + 0^s,0146\ (\varpi - 753^{mm}).$$

M. Van de Sande Bakhuyzen (Observatoire de Leyde)

[1] Tisserand, *Bull. astr.*, t. XIII, p. 255; voir aussi *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. CXXII, p. 646.

[2] Boquet, 4, *Annales de l'Observatoire de Paris* (Observations), séries de jour, 1894 août 13 à 1895 janv. 17.

emploié, pour sa pendule à compensation à mercure, précisément le coefficient $0^s,0140$. A l'Observatoire de Lisbonne (Tapada), on a trouvé que chaque variation de 1^{mm} dans la pression change la marche diurne de l'horloge de $0^s,016$.

Parmi les causes qui peuvent avoir une certaine influence sur la marche d'une pendule, on doit indiquer la période du remontage. M. Doberck [1] a constaté que la pendule Dent à Hongkong marchait plus vite après le remontage. Il est donc bon de noter sur les registres d'observations le moment où on a effectué cette opération.

Pour modifier la marche d'une pendule, il suffit d'élever ou d'abaisser la masse pesante du régulateur, suivant que la pendule retarde ou avance. Un index permet de se rendre compte, en fractions du tour de la vis, de la quantité dont on a déplacé la lentille. Ce procédé oblige de mettre l'horloge à l'arrêt, ce qui présente un grave inconvénient, surtout lorsqu'il s'agit d'une pendule synchronisant toutes les horloges d'un observatoire. Il est préférable d'employer le système appliqué par Le Verrier à la pendule directrice des circuits urbains, et qui consiste à ajouter ou à retrancher des poids dans une cassolette fixée à la tige du balancier. On détermine empiriquement les poids qui correspondent à des différences de marche déterminées. Le seul inconvénient de cette méthode, c'est d'exiger l'ouverture de la caisse de la pendule. Il faut aussi une certaine délicatesse de main pour poser ou enlever les petites masses. M. Fénon [2] a

[1] Doberck, *The Observatory*, vol. XVIII, p. 297.

[2] Stéphan, 2, *Annales de la Faculté des Sciences de Marseille*, t. X, p. xxiii.

imaginé un système dans lequel le poids additionnel glisse comme un curseur le long de la tige; un fil de bronze silicié de $0^{mm},1$ d'épaisseur, enroulé autour d'un cylindre horizontal finement fileté, un peu au-dessus de l'axe de suspension, jouant le rôle d'une cheville de violon, commande le mouvement du curseur. Ce système, appliqué à Marseille pour la distribution de l'heure, fonctionne dans les meilleures conditions.

Lorsqu'on entretient le mouvement d'un pendule à l'aide d'un rouage d'horlogerie, la durée des oscillations est altérée : il y a perturbation; il n'oscille pas avec la même régularité que s'il demeurait libre. Les forces de frottement et les impulsions transmises au pendule par l'ancre qui lui est attachée modifient le mouvement. Dans les horloges de précision, on a recours à un palliatif. Par une construction habile du rouage, on arrive à rendre la perturbation sensiblement constante. M. Lippmann[1] a cherché dans quelles conditions une impulsion instantanée donnée au pendule doit ne produire aucune perturbation, et il arrive cette à conclusion, que la force destinée à compenser l'amortissement doit avoir lieu au moment où le pendule passe par sa position d'équilibre. Pour entretenir le mouvement, une impulsion isolée ne suffit pas. Deux impulsions données en un même point, l'une à la montée, l'autre à la descente, produisent des perturbations égales et de sens contraire. Il est bon de produire les impulsions au moment du passage par la position d'équilibre. Les perturbations produites sont alors isolément nulles, ou du moins infiniment petites, et, en alternant leurs signes,

[1] Lippmann, 1, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. CXXII, p. 104, et t. CXXVII, p. 15.

on rend nulle leur somme algébrique. Le dispositif électrique imaginé par M. Lippmann a permis de réaliser ces conditions. Lord Kelvin a construit une horloge dans laquelle les impulsions ont lieu au moment du passage par la verticale et dont le fonctionnement est parfaitement régulier.

25. **Synchronisation électrique des horloges.** — Une pendule installée de manière à ne pas subir l'influence des variations de température ou de pression aura une marche parfaitement régulière. Elle n'éprouvera, du moins, que de très faibles variations qu'il est difficile de supprimer complètement et qui tiennent à des causes multiples : état des huiles, vibrations du pilier, mode de suspension du pendule, état hygrométrique de l'air enfermé dans la caisse, imperfections du tracé des dents, etc. Le problème dont nous allons nous occuper est de transmettre à diverses horloges le mouvement d'une pendule normale, les synchroniser. C'est à l'électricité qu'est confié le rôle de soumettre les pendules secondaires à la pendule directrice. La première idée du dispositif que nous allons décrire est de L. Foucault; il a été réalisé par Winnerl et perfectionné par M. Fénon. Il présente de grands avantages sur le procédé de Saxton[1], aujourd'hui peu employé, parce que ce dernier emprunte la force directement au pendule, ce qui présente de graves inconvénients.

Sur l'axe de la roue d'échappement est fixée une autre roue O (fig. 28) comprenant 60 dents triangulaires; elle fait, comme la première, un tour par minute. Une lame-

[1] Chauvenet, vol. II, p. 87.

ressort LP, très légère, est terminée par une pierre P qui peut s'engager dans les entailles de la roue O. Lorsque le ressort est abaissé, l'ailette *ll*, en forme d'S allongée, attachée au pivot I, est dégagée. Ce pivot est relié par un rouage qui n'est pas représenté sur la figure avec la roue E. Un poids spécial entraîne ce rouage, qui ne peut se mouvoir que quand la pierre P est engagée dans une entaille. La roue E avance alors d'une dent et repousse

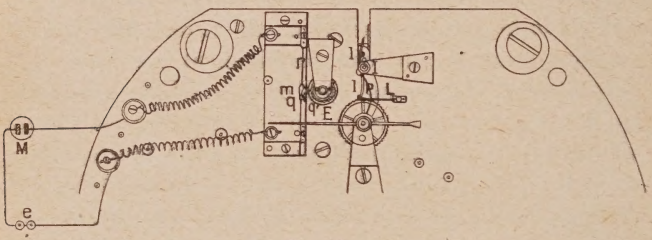


Fig. 28.

le ressort *r*. Le contact qui avait lieu entre *q* et *q'* est interrompu ; il ne se rétablit que lorsque le doigt *m* du ressort *r* pénètre à nouveau dans le creux d'une des dents de la roue E. Ainsi l'interrupteur est conduit par un rouage indépendant du rouage de la pendule, avec lequel il n'est en relation que par l'échappement spécial qui comprend la roue O, le ressort LP et l'ailette *ll*. Lorsque le contact est établi entre *q* et *q'*, le courant de la pile M passe dans un électro-aimant *e*, dont nous verrons bientôt le rôle dans l'action synchronisatrice.

On emploie quelquefois un système plus simple dans lequel le rouage intermédiaire est supprimé. Sur la roue O (fig. 29) portée par l'axe de la roue d'échappe-

ment s'appuie l'extrémité p d'un levier pq, mobile autour de I ; cette extrémité p est formée d'une pierre dure qui suit le profil des dents de la roue O et se trouve, par suite, alternativement au fond et à la pointe des dents. Il suffit de jeter un coup d'œil sur la figure pour com-

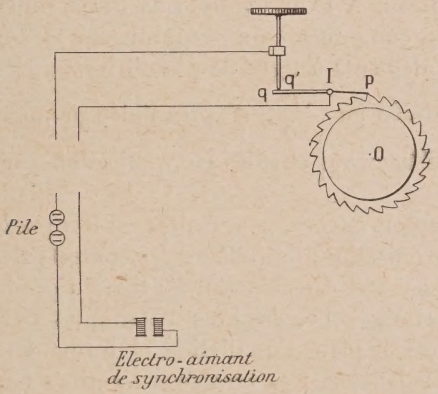


Fig. 29.

prendre comment le courant est établi ou rompu, suivant qu'il y a ou non contact entre q et q'. A l'Observatoire d'Uccle [1], la durée du contact est d'une seconde et cesse pendant la seconde suivante. Le dispositif qui précède est celui adopté pour la pendule Berthoud de temps moyen, directrice des circuits urbains de la Ville de Paris, avec cette différence que dans cette dernière le

[1] Delporte, *Installation des pendules à l'Observatoire de Belgique*, Annuaire pour 1907.

levier est vertical et maintenu en position par un ressort[1].

Pour éviter l'étincelle de rupture entre q et q' qui, à la longue, corroderait les surfaces, on peut maintenir le courant constamment fermé avec une bobine de très grande résistance, ou mettre en dérivation un condensateur Fizeau. A l'Observatoire de Paris, on établit une dérivation comprenant un accumulateur formé de deux ou trois éléments à tiges de plomb immergées dans de l'eau acidulée au $\frac{1}{10}$, d'après l'idée première donnée par M. d'Arsonval et mise en application par M. Guénaire.

On emploie encore, pour établir ou rompre le courant de synchronisation, le système des contacts Breguet, où le balancier agit directement. La tige du pendule porte, à droite et à gauche, des bras métalliques BC (fig. 30) situés dans le plan d'oscillation et formant croix avec l'axe du balancier. Ces bras sont terminés par des traverses horizontales C formant un T, sur lesquelles se trouvent trois pointes de platine P également distantes. Au niveau des traverses, on a placé des supports métalliques fixes portant chacun un axe OO autour duquel pivotent trois lamelles L très légères (en aluminium, par exemple) qui reposent sur des vis de réglage V, placées à peu près au tiers de la longueur des lames comptée à partir du pivot. Lorsque le pendule oscille, les pointes des traverses soulèvent alternativement les lamelles, à gauche et à droite, en établissant un contact qui ferme le circuit dans lequel se trouvent les bobines

[1] Mascart, 2, *Bull. astr.*, t. XXIV, p. 161.

de synchronisation. Le réglage de l'appareil est très aisé. Le support métallique des axes O est fixé à une glissière commandée par une vis, ce qui permet d'obtenir un premier réglage. On complète l'opération en agissant successivement sur chaque lamelle à l'aide de

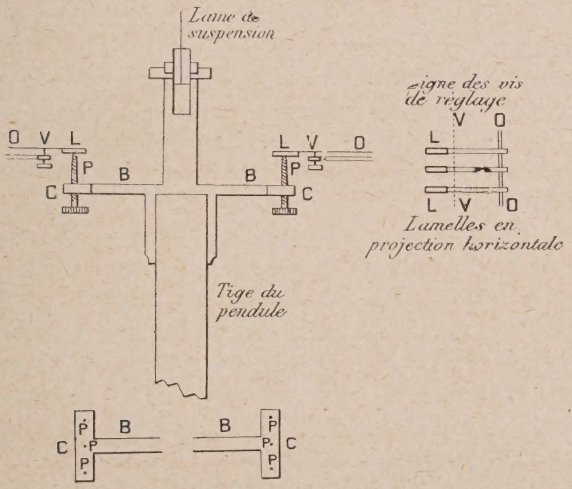


Fig. 30.

la vis qui la soutient. Grâce à la disposition des lames, le nettoyage des contacts peut s'effectuer sans arrêter le pendule et sans supprimer l'effet de synchronisation, deux des lamelles restant actives pendant le nettoyage de la troisième. Enfin il est évident qu'avec un triple contact de chaque côté on pare aux manques qui peuvent se produire et compromettre la transmission électrique. Le seul inconvénient de ce système, c'est qu'il a sur

les oscillations du balancier une influence considérable et surtout variable, ce qui l'a fait abandonner, comme système de synchronisation, pour transmettre le courant de la pendule directrice aux pendules secondaires. Cet inconvénient est bien moindre lorsque le pendule est synchronisé et surtout lorsqu'il doit fonctionner sans rouage. Tel est le cas du pendule (sans horloge) à triple contact, qu'à notre demande[1] on a installé pour la synchronisation des chronographes Gautier de l'Observatoire de Paris. Ce pendule fonctionne depuis le mois de mars 1906; il n'a pas eu en trois ans un seul manque par mauvais contact, et il est resté en parfaite synchronisation avec la pendule directrice.

M. Brooks[2] a employé pour l'étude d'un chronographe imprimant un dispositif qui rappelle celui de Saxton[3]. A l'aide d'une capsule de mercure et d'un couteau de platine fixé à la tige du balancier, on ferme le courant et on le maintient fermé pendant une seconde, puis on l'ouvre et on le maintient fermé pendant la seconde suivante. Nous citerons enfin le dispositif de M. Blinn[4] pour transmettre les battements de pendule sans interposition de contacts dont l'idée première, pensons-nous, est due à M. W. Meyer.

Quel que soit le dispositif adopté pour l'interrupteur électrique, on ne fait généralement usage, pour ménager les contacts, que d'un faible courant, celui de deux éléments Gallaud, par exemple. Si le nombre des pendules à synchroniser est assez grand, on procède comme

[1] Boquet, **11**, et Chatelu, **4**, *Bull. astr.*, t. XXIII, p. 433.
[2] Brooks, *The sidereal Messenger*, vol. VII, p. 346.
[3] Chauvenet, t. II, p. 89.
[4] Blinn, *The sidereal Messenger*, vol. X, p. 475.

l'a fait M. Wolf[1] à l'Observatoire de Paris : on n'exige pas de la pendule fondamentale le travail complet, on l'oblige simplement à actionner un relais intermédiaire. Nous empruntons en grande partie au savant astronome les détails de cette installation-type. Il y a actuellement à l'Observatoire de Paris douze pendules secondaires conduites par l'une des pendules directrices. A chaque oscillation du balancier de l'horloge principale, le relais ouvre et ferme un circuit électrique dont l'intensité a été calculée en raison du nombre des appareils à synchroniser et de leur résistance. Ce courant est pris en dérivation pour chaque pendule, ou quelquefois pour un groupe de deux pendules. On aurait évidemment pu mettre les appareils de synchronisation en série. Avec le dispositif adopté, un dérangement peut se produire dans l'un des circuits, les autres n'en seront pas affectés. Cette disposition n'est d'ailleurs pas pratique quand les pendules sont très éloignées, comme c'est le cas pour les horloges d'une ville. Le plus grave accident qui pourrait se produire, dit M. Wolf, serait que l'interruption par la pendule directrice devînt continue. Pour prévenir l'arrêt des pendules qui en résulterait, on introduit, dans le circuit principal de la grande pile, un relais de sûreté, véritable soupape qui renvoie directement à la pile le courant qui deviendrait trop énergique ou continu.

L'horloge-type étant munie de son interrupteur, il nous reste à voir comment s'effectue la synchronisation. La partie inférieure A (fig. 31) du pendule OA de l'horloge secondaire se termine par une armature de fer

[1] Wolf, **3**, *Bulletin de la Société internationale des électriciens*, 1885, p. 105.

doux F en forme de parallélipipède rectangle, dont la grande dimension est perpendiculaire au plan d'oscillation. Cette armature oscille devant les deux branches E, E d'un électro-aimant. A chaque seconde, l'action magnétique développée par le passage du courant dans le circuit commandé par l'interrupteur agit sur l'armature au moment où le pendule arrive à l'extrémité de sa course. Le rythme des oscillations du pendule secondaire devient identique à celui du balancier de l'horloge directrice. L'expérience a montré que l'on n'obtient le synchronisme que si le pendule à régler avance légèrement, quatre à cinq secondes par jour environ. M. Wolf a plusieurs fois réglé des horloges qui retardaient, mais avec un courant d'une intensité absolument constante. Cette dernière condition étant difficile à assurer, il est plus simple de maintenir à l'avance la marche du pendule à régler. Nous avons constaté le déréglage d'un pendule synchronisé dont l'avance diurne n'était pas d'une seconde, par ce seul fait qu'une forte variation de pression barométrique avait fait passer la marche relative de l'avance au retard. M. Wolf a constaté qu'une condition essentielle de bon fonctionnement des électros-synchronisateurs est que la résistance des bobines soit très grande relativement à celle de la pile.

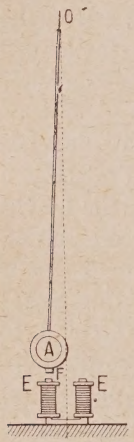


Fig. 31.

Quelquefois le système synchronisateur ne comporte qu'un électro-aimant E (fig. 32), placé soit à gauche, soit à droite de la position verticale de la

tige du balancier. L'action magnétique n'a lieu que toutes les deux secondes. Si le courant de synchronisation est faible, comme dans le cas où on emploie le courant de l'interrupteur de la pendule, il est nécessaire de réduire l'avance diurne à son minimum.

On a aussi construit des armatures triples (fig. 33), de sorte qu'à la fin de chaque oscillation deux d'entre elles se trouvent en regard des deux noyaux magnétiques. On double ainsi l'action synchronisatrice. Ce système a été installé à la pendule Fénon du Grand Équatorial coudé (Observatoire de Paris), et donne une grande sécurité de fonctionnement à l'appareil.

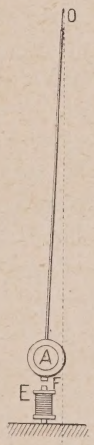


Fig. 32.

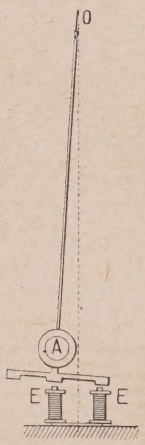


Fig. 33.

Les bobines des électros sont montées de façon qu'on puisse, à l'aide de vis de réglage, leur donner l'écartement voulu qui doit être en concordance avec l'amplitude du pendule en marche libre. Les supports peuvent s'élever ou s'abaisser de manière à placer les noyaux des électros aussi près que possible de l'armature du pendule. Cette distance doit être au maximum d'un demi-millimètre. Pour éviter les chances d'aimantation de la tige du pendule synchronisé, on relie l'armature à cette tige par une pièce de laiton. Le système de synchronisation dont nous venons d'exposer les principes s'applique

aussi à un simple pendule oscillant sans rouage, l'action magnétique remplaçant l'action de l'échappement pour entretenir le mouvement pendulaire.

C'est Foucault qui, en 1847, a formulé le principe de la synchronisation des horloges par l'action électromagnétique à propos d'une communication de Faye sur le moyen de soustraire les horloges astronomiques aux influences des variations de pression et de température. Ce système, dans lequel l'électro était placé latéralement, exigeait des amortisseurs. Le système que nous avons décrit est celui de Vérité, de Beauvais, modifié par M. Ch. Wolf[1]. Cornu[2] réalise la synchronisation à l'aide d'un aimant fixé au pendule. Cet aimant est aspiré dans une gaine quand le courant de la pendule-type est fermé. Ce système a été peu appliqué jusqu'à présent.

26. **Chronomètres.** — Dans les observatoires, l'emploi des chronomètres est à peu près limité à la comparaison des pendules. Pour les marins et les voyageurs, au contraire, le chronomètre remplace complètement la pendule astronomique. L'étude de cet instrument a été faite d'une façon complète et, en même temps, essentiellement pratique par M. E. Caspari[3], ingénieur hydrographe de la marine.

La place dont nous disposons dans l'**E. S.** ne nous permet pas d'analyser ce travail. La question de la cons-

[1] Wolf, **4**, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. CV, p. 1155.

[2] Cornu, **2** et **3**, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. CV, p. 1106 et 1209.

[3] Caspari, *Cours d'astronomie pratique*, 1re partie, p. 225.

truction et du réglage des chronomètres a d'ailleurs été traitée dans un volume spécial.

Les chronomètres donnent : soit le temps moyen, soit le temps sidéral. La détermination de la correction d'un chronomètre se fait par comparaison avec une pendule dont on connaît l'état. Si le chronomètre et la pendule indiquent le même temps (moyen ou sidéral), la comparaison se fait par estime, en écoutant les battements des deux appareils; on arrive aisément à une approximation de $0^s,1$. Si le chronomètre indique le temps moyen et la pendule le temps sidéral ou inversement, la comparaison se fait par coïncidence des battements avec une précision bien plus grande. Six minutes de temps moyen valent environ $6^m.1^s$ de temps sidéral. Si à un moment donné il y a coïncidence de battement, cette coïncidence se reproduira six minutes de temps moyen après. On est donc certain d'avoir, dans un intervalle de six minutes, une coïncidence, ce dont l'oreille juge avec autant d'exactitude que l'œil juge de la coïncidence de deux traits. Lorsque le chronomètre bat la demi-seconde, il y a une coïncidence par trois minutes.

Supposons que nous ayons comparé un chronomètre de temps moyen à une pendule de temps sidéral dont la correction est égale à c_p. Soient, au moment d'une coïncidence, t_p l'heure de la pendule sidérale et t_c celle du chronomètre de temps moyen. La *Connaissance des Temps* donne pour la date indiquée le temps sidéral t_s à midi moyen. On calculera l'expression

$$t_p + c_p - t_s,$$

et en retranchant la correction c_r de réduction du temps sidéral en temps moyen (*C. d. T.*, table V), on aura le

temps moyen astronomique correspondant à l'heure sidérale t_p. La correction du chronomètre sera :

$$[(t_p + c_p - t_s) - c_r] - t_c.$$

Les horlogers emploient souvent des chronomètres donnant les $\frac{2}{5}$ de seconde. Il y a cinq battements par deux secondes à partir des secondes paires. On les appellera par les numéros 2, 4, 6, 8, 10 et on cherchera à l'oreille celui qui se trouve en coïncidence ou presque avec le battement de la pendule indiquant le même temps. Au moment où le chronomètre marque 0 seconde, on note l'heure de la pendule; puis on ajoute à cette seconde 0 un nombre de cinquièmes égal au chiffre de la coïncidence, nombre qu'on doublera pour le transformer en dixièmes suivant l'usage d'écrire les fractions de seconde.

27. **Relais.** — Le jeu des électros de synchronisation exige, en général, un courant assez fort qu'on ne peut faire passer dans l'interrupteur de la pendule. On tourne la difficulté, ainsi que nous l'avons dit, par l'emploi du relais imaginé par Wheatstone. Le relais actionné par la pile faible (n° 1) de la pendule-type lance dans le circuit le courant d'une pile assez forte (n° 2). Il se compose d'un électro-aimant BB (fig. 34) mis en jeu par la pile n° 1; lorsque l'armature O s'abaisse, le levier L mobile autour de A vient en contact avec une vis V qui est reliée à l'un des pôles de la pile n° 2 de manière à fermer le circuit de celle-ci, dont l'autre pôle est en communication par le ressort de rappel R avec le levier AL. La distance entre les noyaux de l'électro et l'arma-

ture peut se régler, ainsi que la hauteur de la pointe de la vis V, de façon à assurer une attraction normale de l'armature et un bon contact en V. La vis U sert à régler le jeu du levier AL en hauteur ; elle s'appuie sur un bouton isolant placé à l'extrémité L du levier AL. Pour obtenir un rappel franc de l'armature, M. Hipp a remplacé le faible ressort par deux forts ressorts antagonistes à faible différence d'action. M. Siemens a inventé

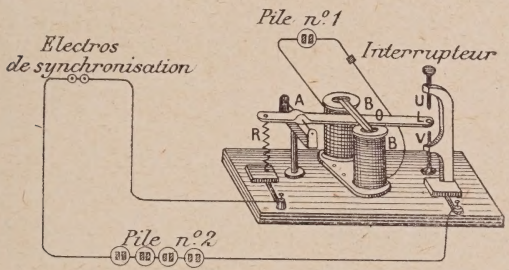


Fig. 34.

un relais qui fonctionne sous l'influence d'une très faible force. A côté l'un de l'autre, sont placés deux électro-aimants simples, leurs pôles opposés P, P′ (fig. 35) situés d'un même côté. Les cylindres de fer emboîtés dans les électros portent des pièces de fer doux C, C′ ; le premier cylindre est fixe, le second est mobile autour de son axe. Quand le courant de la pile n° 1 passe dans les électros, la pièce C′ est attirée, le bras B vient toucher la vis V, et par l'intermédiaire du ressort R, le circuit n° 2 est fermé. Quand le courant de la pile n° 1 cesse, le levier L vient s'appuyer sur un

bouton isolant I. Le réglage se fait à l'aide de la vis U.

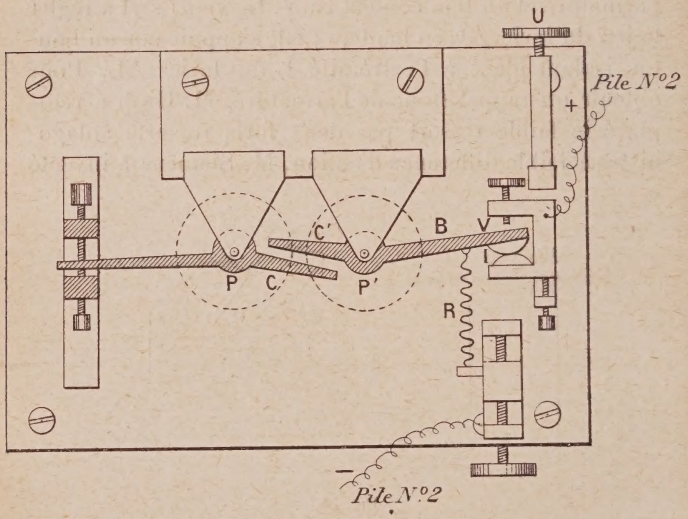


Fig. 35.

28. **Parleurs.** — Le bruit de l'échappement d'une pendule est très faible, et pour le percevoir nettement, il est souvent nécessaire d'appliquer l'oreille contre les parois de la caisse. Pour le rendre perceptible à l'observateur placé près de l'oculaire, à une distance plus ou moins grande de l'horloge, on emploie le parleur, dont le bruit remplace celui de l'échappement. En général, ce dernier bruit se produit un peu avant que le pendule arrive à l'extrémité de sa course, et même avec un système de pendules synchronisées, la seconde ne serait pas battue au même instant dans toutes les salles. Avec le

parleur intercalé dans le circuit, il n'en est plus de même; l'horloge d'observation sert simplement à numéroter la seconde, la minute et l'heure. En réalité, le réglage des parleurs a une influence sur le moment des battements, et il est difficile d'affirmer leur coïncidence absolue. Nous avons pu constater des différences de $0^s,1$ à $0^s,2$ pour des relais voisins situés l'un et l'autre dans le circuit de synchronisation de l'Observatoire de Paris.

Le dispositif adopté à Paris est de M. Fénon. Le courant de synchronisation passe dans les bobines d'un électro-aimant EE (fig. 36). L'armature M est portée par

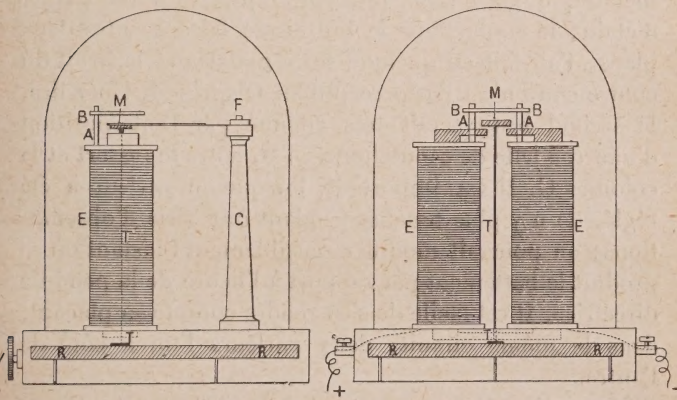


Fig. 36.

une lame d'acier FM fixée en F sur la colonne C, au moyen d'une vis de pression. Lorsque le courant est fermé, M est attirée, et la lame FM vient frapper par la pièce M sur une tige métallique TT qui s'appuie par son extré-

mité inférieure sur une boîte de résonance RR en acajou. La distance du noyau de l'électro à l'armature est variable et peut se régler comme dans le relais : il suffit d'agir pour cela sur la vis V. Le jeu de l'armature est limité en hauteur au moyen d'un buttoir B supporté par les colonnes A, A. La lame, en frappant cet arrêt, peut produire un léger battement qu'il est essentiel d'éviter, l'astronome ne devant percevoir que le bruit de la seconde de la pendule directrice. On garnit alors la partie qui vient toucher le buttoir d'une petite rondelle de caoutchouc. On peut encore, comme l'a fait M. Hamy, placer au-dessus de l'armature une lame métallique garnie de plusieurs épaisseurs de papier d'étain ; le contact sur le buttoir se faisant entre deux plans, l'air fait en quelque sorte matelas et le bruit du contre-coup n'est pas perceptible. D'après M. Guénaire, le second bruit serait très atténué par l'interposition d'une rondelle de caoutchouc en F, entre le ressort et la colonne C. Il est important, lorsque le parleur a été réglé, de n'y plus toucher pendant une série d'observations ; on pourrait modifier sensiblement l'instant où se produit le battement par rapport à l'heure de la pendule directrice. Il est facile de s'en rendre compte en plaçant, dans le même circuit, deux parleurs l'un à côté de l'autre.

Nous signalerons encore le procédé employé par M. Brillouin[1] à l'Observatoire de Toulouse, et qui consiste à actionner un téléphone à l'aide du fil induit d'une petite bobine de Ruhmkorff. La partie inférieure du pendule est munie d'une pointe de platine. Chaque

[1] Brillouin, *Annales de l'Observatoire de Toulouse*, t. II, p. C. 1.

fois que le pendule passe par la verticale, cette pointe passe devant une pointe fixe, un flux d'étincelle jaillit et produit dans le téléphone un bruit intense. Un dispositif particulier permet de ne laisser passer le courant à travers ce téléphone que pendant un temps très court et sensiblement constant.

CHAPITRE III

L'ENREGISTREMENT DES OBSERVATIONS

29. **Chronographes.** — L'expérience a montré qu'on augmente considérablement la précision des observations par l'emploi de chronographes. Le chronographe, suivant l'expression de Chauvenet, est à la pendule ce que le microscope est au cercle gradué : il permet de subdiviser la seconde de temps et d'en mesurer micrométriquement les fractions. Les avantages du chronographe n'avaient pas échappé à W. Bond, promoteur de ce procédé d'évaluation du temps. Cependant, l'usage de ces appareils a été long à se généraliser en France. M. Wolf[1] écrivait, il y a quelque trente-cinq ans : « L'emploi du chronographe électrique a été pendant quelques années très prôné en Allemagne et en Angleterre ; aujourd'hui, l'enthousiasme semble un peu refroidi. A l'Observatoire de Paris, M. Le Verrier s'est constamment refusé à l'introduire dans la salle méridienne. » A l'heure présente, il n'y a plus un observateur pour contester la supériorité de la méthode chro-

[1] Brunnow, *Astronomie pratique*, note de la page 427.

nographique. Les trois lunettes méridiennes de notre Observatoire national sont munies de chronographes.

Il existe actuellement deux types de chronographes également employés : les chronographes à pointes et les chronographes imprimants.

Parmi les premiers, nous examinerons sommairement le chronographe à cylindre tournant imaginé par Airy et le chronographe à bande. L'emploi de ces chronographes, il faut le dire, présente de nombreux inconvénients : le relevé des observations est pénible, les causes d'erreurs matérielles de lecture ou de copie sont nombreuses. C'est peut-être là une des causes de leur défaveur. Aussi des astronomes, habiles praticiens, eurent-ils l'idée de remplacer le mode primitif d'enregistrement par l'impression en caractères ordinaires. Les principaux types de chronographes imprimants sont ceux de M. Hough, d'Young, de M. l'abbé Verschaffel et de M. P. Gautier. Nous les étudierons successivement, en nous attachant surtout à ceux qui nous semblent appelés à remplacer définitivement les anciennes méthodes d'enregistrement.

3o. **Chronographe à cylindre.** — Le chronographe à cylindre se compose de deux parties : le rouage et l'enregistreur. Le rouage, entraîné par un poids moteur, a pour objet d'imprimer à un cylindre un mouvement de rotation uniforme et continu autour de son axe. Pour atteindre ce but, Airy a fait usage du pendule conique, c'est-à-dire d'un pendule dont la tige décrit régulièrement un cône dont le sommet est le point de suspension. La suspension est du type dit à la Cardan.

L'appareil enregistreur se compose de deux plumes

situées au-dessus d'une même arête du cylindre. Ces plumes sont mises en mouvement par deux électros situés dans deux circuits différents. Les électros sont fixés à un chariot conduit par une vis de faible pas. Le chariot se déplace suivant une arête. Les traces des plumes, sur le papier enroulé autour du cylindre, forment des hélices. Sur le papier développé, ce sont des droites parallèles. L'interrupteur de l'horloge en agissant sur l'un des électros fait marquer à la plume des encoches équidistantes indiquant les secondes. Au moment où l'étoile passe par un des fils du réticule, l'observateur donne un top, en pressant sur un bouton électrique. Le second électro entre en action, la seconde plume s'appuie sur le cylindre et marque une encoche. La position de cette dernière par rapport à celles qui indiquent les secondes donne la seconde et le dixième correspondant au moment du passage de l'astre sous le fil.

Pour évaluer ce dixième avec précision, on placera une règle graduée sur les encoches comprenant le pointé; on mesurera ainsi la position avec plus de précision que par simple estime.

L'enregistrement peut aussi se faire à une seule plume, comme nous l'expliquons plus loin.

On trouvera une description avec figures du chronographe employé à Greenwich, dans le volume des Observations de 1856 (appendice).

31. **Chronographes à bande**. — Les chronographes à bande sont à une ou à deux plumes. Leur dispositif rappelle celui du récepteur du télégraphe Morse. Une bande de papier se déroule à peu près uniformément au moyen d'un rouage mis en mouvement

par la chute d'un poids ou par l'action d'un ressort. Dans le chronographe à une seule plume, la feuille de papier passe sur un cylindre de petit diamètre au-dessous duquel se trouve la plume. Celle-ci, en connexion avec l'armature d'un électro, est mise en mouvement, à chaque oscillation du pendule, par l'action de l'interrupteur. La plume laisse donc sur le papier une série de traces divisant la bande en longueur correspondant à une seconde. Ces longueurs sont plus ou moins grandes suivant la rapidité de déroulement du papier. Si on faisait agir la plume par l'action d'un ressort, contre le jeu de l'électro, on aurait une série de petits traits distants d'une seconde. Pour faciliter la lecture et permettre de ne pas se tromper dans cette série de points, on ajoute à l'appareil un interrupteur agissant sur la plume toutes les minutes et quelquefois, pour plus de sécurité, deux interruptions toutes les quinze minutes. Imaginons maintenant que l'observateur ait près de lui un bouton de construction spéciale, produisant l'interruption du courant. Le top donné par l'observateur produira sur la bande une interruption facile à distinguer des secondes.

Dans le chronographe à deux plumes, chacune d'elles est mise en jeu par un électro-aimant. Ces deux électros sont reliés l'un à l'interrupteur de la pendule, l'autre au bouton électrique que l'observateur a à sa disposition. Ces électros sont dans deux circuits distincts.

32. **Relevé des bandes.** — Pour faciliter la lecture des bandes et la rendre plus précise, on se sert d'une échelle de verre (fig. 37) sur laquelle sont gravées onze droites parallèles équidistantes, divisant la seconde

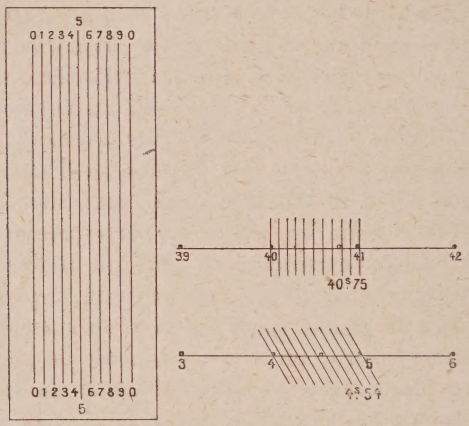


Fig. 37. — Échelle de lecture. Lignes parallèles.

enregistrée en dixièmes; les centièmes s'obtiennent à l'estime (dixièmes de dixièmes). Lorsque la longueur de la seconde est plus grande que la distance des lignes I à II, on place l'échelle obliquement, de manière que les lignes extrêmes de l'échelle passent par les deux points extrêmes de la seconde. On emploie quelquefois une échelle à lignes divergentes (fig. 38), les angles de deux droites voisines étant constants. On fait glisser l'échelle en maintenant la droite médiane 5, 5, perpendiculaire à la ligne des secondes jusqu'à ce que les points extrêmes coïncident avec les traits extrêmes.

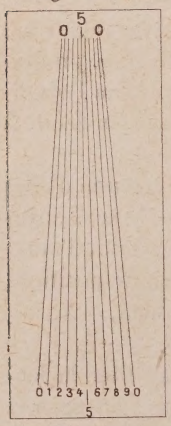


Fig. 38.
Échelle de lecture.
Lignes divergentes.

M. L. de Ball[1] emploie, pour le relevé des bandes chronographiques, un appareil formé d'un cadre mobile, en forme de parallélogramme articulé, sur lequel sont tendus neuf fils parallèles.

33. **Chronographe imprimant de Young**[2]. — Un axe A (fig. 39) est animé d'un mouvement de rotation uniforme d'un tour par seconde. Un second axe B, situé sur le prolongement du premier, mais non relié à lui, du moins directement, porte à son extrémité opposée à A la roue *tt* sur laquelle se trouvent les caractères d'imprimerie *i*, *i* gravés en relief sur la tranche. Un bras *f* est attaché à A; un bras semblable *b* est fixé à B. Ce dernier bras porte une petite tige *dd'* parallèle aux axes de rotation A et B, sur laquelle le bras *f* peut venir s'appuyer. Il est clair que l'axe A, dans son mouvement de rotation, entraînera avec lui, par l'intermédiaire de *f* et de *d*, l'axe B et, par suite, la roue d'impression *tt*. Alors les deux axes seront solidaires.

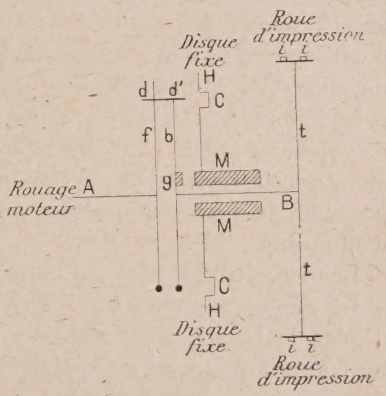


Fig. 39.

[1] L. de Ball, **1**, *Astr. Nach.*, vol. CXV, col. 263.

[2] Young, *American Journal of Science*, 2e série, vol. XLII, p. 99, ou aussi Boquet, **8**, *Bull. astr.*, t. XXII, p. 257.

Mais si, au moment du top, on peut supprimer pendant un instant très court le contact de *d* et de *f*, c'est-à-dire faire que *f* ne s'appuie plus sur *d*, la roue *tt* pourra être immobilisée et l'impression obtenue. La tige *dd'* remise à sa première position, le bras *f* la rencontrera de nouveau, une seconde exactement après l'avoir quittée, et remettra tout le système en mouvement. L'arbre A subit de ce fait deux perturbations : l'une qui tend à accélérer son mouvement, elle se produit lorsque A cesse d'entraîner B ; l'autre qui tend à le retarder par suite du choc dû à l'inertie de B et de ses accessoires. Il n'y a évidemment à considérer que la différence de ces deux effets, et si le régulateur a une masse considérable alors que la roue *tt* est, au contraire, aussi légère que possible, la perturbation sera presque ou entièrement négligeable.

Le dispositif de l'appareil est extrêmement ingénieux.

Le déplacement de l'index *dd'* au moment du top dégage le bras *f*, arrête la roue *tt* et établit en outre un courant qui, par l'intermédiaire d'un électro-aimant, détermine le choc des marteaux sur les roues. Pour cela on a placé parallèlement à la roue *b* un disque fixe HH dans lequel on a pratiqué cent encoches C, C, placées sur une circonférence d'un rayon égal à celui de la roue *b*. Ces encoches sont donc constamment en regard de *d'*. Le barreau de fer doux de l'électro-aimant qui doit attirer *b* est remplacé par un manchon MM qui enveloppe l'axe B et qui agit sur l'armature *g* lorsque l'observateur envoie le signal, et cela quelle que soit la position de *b*, puisque *g*, a toujours la même position par rapport à MM.

Nous n'entrerons pas dans plus de détails sur cet

intéressant appareil qui, pensons-nous, n'est pas employé. Nous ferons seulement remarquer que l'inventeur s'est appliqué à obtenir l'arrêt de la roue pendant le temps de l'impression, tandis que, dans les appareils que nous allons étudier, l'impression se fait sans arrêt, sur une roue faisant un tour par seconde.

34. **Chronographe imprimant de Hough**[1]. — M. le professeur Sampson[2], de Durham, emploie régulièrement un chronographe imprimant de Hough, et, grâce aux renseignements qu'il a bien voulu nous communiquer, nous pouvons donner une description très complète de cet ingénieux appareil.

Trois roues A, B, C (fig. 40) sont situées sur un même axe ; sur la tranche de ces roues on a gravé, en relief, des caractères d'imprimerie. La première A fait un tour par heure, elle porte sur son pourtour les nombres 0 à 59 ; la deuxième B, ou roue des secondes, fait un tour par minute et porte aussi les caractères 0 à 59. Ces deux roues sont commandées par l'horloge sidérale et elles avancent par à-coups à chaque seconde. Le rouage qui les fait mouvoir est placé en R, en avant de la figure. La troisième roue C, ou roue rapide, effectue sa révolution en une seconde. Elle est conduite par un rouage spécial D, celui-ci placé à l'arrière de la figure, et son mouvement ne se fait pas par à-coups. Elle tourne sans interruption, sa vitesse de rotation

[1] Hough, **1**, *American Journal of Science*, 3e série, t. II, p. 436 ; *The sidereal Messenger*, vol. V, p. 161 ; *Monthly Notices*, vol. XXXII, p. 86 ; *Astr. Nach.*, vol. LXXVIII, col. 369, et vol. LXXXII, col. 159 ; *Annual Report of the Chicago astronomical Society for 1885 and 1886*, app. D, p. 42.

[2] Sampson, *Monthly Notices*, vol. LXIII, p. 357.

pouvant d'ailleurs être accélérée ou retardée. Si la marche de la roue rapide est exactement d'un tour par seconde, la pendule sidérale est sans action sur cette roue ; si sa vitesse s'accélère, elle est retenue à un certain point de sa révolution jusqu'à ce que l'interrupteur

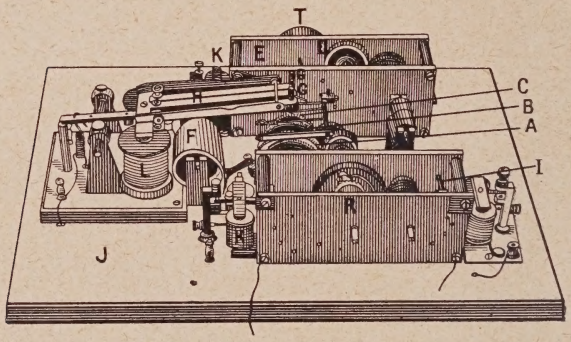


Fig. 40.

de la pendule agisse et soulève un bras E qu'elle ne pouvait franchir. Le rouage est réglé de façon que la roue rapide ait une marche légèrement à l'avance, pour que l'action de l'interrupteur soit équivalente à celle d'un léger frein. Sous l'action du courant envoyé par l'interrupteur, E s'élève, soulevant la pointe *n* pour la dégager de M (fig. 41). Si la pointe *n* restait soulevée d'une façon permanente, le mouvement du rouage ne s'accélérerait pas, le rouage étant commandé par les masses R du régulateur (*Frauenhofer friction balls*). Ces masses sont reliées par des lames flexibles SS à l'axe Q et peuvent s'appuyer contre la cloison intérieure d'un tambour tronconique TT. On règle leur position à l'aide

de la vis située à l'une des extrémités de l'axe Q, l'autre extrémité s'appuyant sur un support maintenu par un ressort *r*. On ajuste la vis V de façon à donner au rouage une vitesse telle que M vienne toucher le doigt *n* avant que celui-ci ne soit soulevé par l'action de l'électro-aimant K (fig. 40). La roue CC n'est pas liée rigidement à l'axe P, elle est fixée à un ressort spiral X attaché à P. On conçoit que, si le mouvement de rotation venait à se ralentir, le doigt E n'agissant plus,

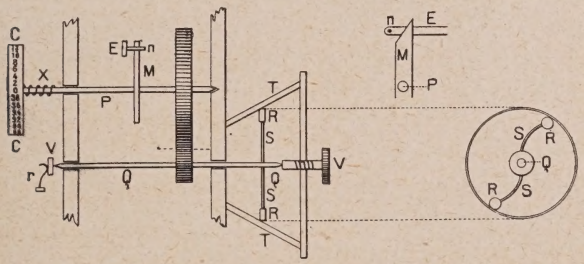


Fig. 41.

le rouage tendrait de lui-même à reprendre de l'accélération ; mais il ne faut jamais laisser tomber la vitesse au-dessous d'une certaine limite à partir de laquelle l'action synchronisatrice serait illusoire.

La roue C porte les nombres pairs de 0 à 98, gravés sur la tranche, de sorte qu'un nombre impair de centièmes n'est indiqué que par les chiffres pairs entre lesquels il est compris. Il y a toujours un des deux nombres pairs (ou des parties de ces nombres) imprimé, et le nombre des centièmes est toujours facile à déterminer. Au-dessus des roues se meut lentement un ruban enduit d'encre ; une bande de papier enroulée sur le

cylindre F (fig. 40) suit ce mouvement; elle est placée entre le rouleau encré et les marteaux G, G, G. Ceux-ci sont mis en mouvement par l'électro L à l'instant du top donné par l'observateur : ils viennent alors frapper le papier contre les roues A, B, C et imprimer sur la bande l'heure de l'observation. Le réglage des marteaux est tel que, même abaissés sous l'action magnétique, ils ne restent pas en contact avec les roues d'impression; ils ne font que donner un choc instantané. Pour obtenir ce résultat, on les a placés à l'extrémité de longs bras flexibles, de sorte qu'ils ne font jamais frein sur les roues. Le papier est mis en mouvement par un troisième rouage I, au moyen d'un mécanisme qui agit automatiquement à l'envoi d'un signal. On peut aussi le déplacer en le soustrayant à l'action de ce mécanisme, afin de laisser tel espace qu'on juge à propos entre les enregistrements successifs. Enfin un dispositif spécial permet d'enregistrer directement les secondes de l'horloge directrice au lieu des signaux donnés par l'observateur : on peut ainsi se rendre exactement compte de la marche de la roue C.

La table sur laquelle repose l'appareil a $0^m,61$ sur $0^m,46$; l'installation en est donc très aisée.

35. **Chronographe imprimant de M. l'abbé Verschaffel.** — M. l'abbé Verschaffel[1] a employé le pendule conique, et il en a obtenu la synchronisation par le procédé suivant. Il donne au pendule conique un mouvement légèrement à l'avance. La manivelle du pendule conique rencontre sur un point de sa révolution une

[1] Verschaffel, *Annales de l'Observatoire d'Abbadia*, Obs. de 1901, préface, p. 13.

barrière que le contact de la pendule abaisse à chaque battement. La durée d'une révolution du pendule conique étant plus courte que l'intervalle des battements de la pendule, à chaque révolution le pendule conique vient heurter la barrière. Si la durée de la révolution est plus courte seulement de $0^s,001$, le choc contre la barrière est faible. Le pendule conique présente à chaque révolution, par rapport à la pendule, une infinité d'états. Il arrive à la barrière avec un état de $-0^s,0005$ et la quitte avec un état de $+0^s,0005$, et passe ensuite graduellement de l'état de $+0^s,0005$ à l'état $-0^s,0005$. De ce chef, il échappe à toute critique grave.

Nous ne pensons pas qu'il soit possible de régler le mouvement du pendule au millième de seconde, et les nombres donnés par M. l'abbé Verschaffel n'ont évidemment d'autre but que de donner une idée de ce que peut être la marche du pendule; mais les expériences que nous avons faites[1] ont mis en évidence que la précision des observations enregistrées avec cet appareil ne le cède en rien à celle des autres chronographes.

Le pendule conique, pour bien marcher, exige une grande égalité dans la traction. L'état des huiles a une influence qu'il faut parfois corriger par l'augmentation ou la diminution du poids moteur de quelques centaines de grammes. On a atténué le choc du pendule sur la barrière en donnant aux deux pièces qui viennent en contact la forme de deux plans inclinés.

Il n'existe que deux chronographes de ce genre :

[1] Boquet, 9, et Chatelu, 2, *Bull. astr.*, t. XXII, p. 283.

l'un a figuré à l'Exposition universelle de 1900 et a été en service pendant plusieurs années à Paris (Lunette de Gambey), il se trouve actuellement à l'Observatoire de Marseille; l'autre est en service régulier à l'Observatoire d'Abbadia. Nous ne croyons pas devoir donner ici la description complète de cet appareil, car nous ne pensons pas qu'on doive en construire de nouveaux du même modèle. Nous renvoyons le lecteur à la description que nous avons donnée dans le *Bulletin astronomique*[1]. Nous devons dire cependant que ce chronographe est le premier qui ait été adopté en France, et que c'est à la persévérance de M. l'abbé Verschaffel que l'on doit l'adoption, chez nous, de ce précieux mode d'enregistrement.

36. **Chronographe imprimant de M. P. Gautier.** — Le chronographe imprimant[2] de M. P. Gautier (fig. 42) se compose essentiellement :

1° D'une horloge dans laquelle les aiguilles sont remplacées par des roues portant sur la tranche les caractères d'imprimerie; un échappement d'un genre particulier permet de mettre l'instrument en synchronisation avec une pendule sidérale;

2° D'un mécanisme d'impression qui rappelle dans son ensemble le dispositif du récepteur Morse (système Digney), mais avec cette différence importante que le

[1] Boquet, **8**, *Bull. astr.*, t. XXII, p. 263.

[2] Boquet, **12**, *Le chronographe imprimant de M. P. Gautier, sa description, son emploi*, Paris, 1907, et *Annales de l'Observatoire de Paris (Mémoires)*, t. XXV, pagination C; voir aussi Brück, **6**, et Sallet, *18e Bulletin chronométrique de l'Observatoire de Besançon*, p. 47.

déplacement de la bande de papier est produit automatiquement par le jeu même du levier d'impression, sous l'influence du courant envoyé par l'observateur; la molette est remplacée par une bande de papier

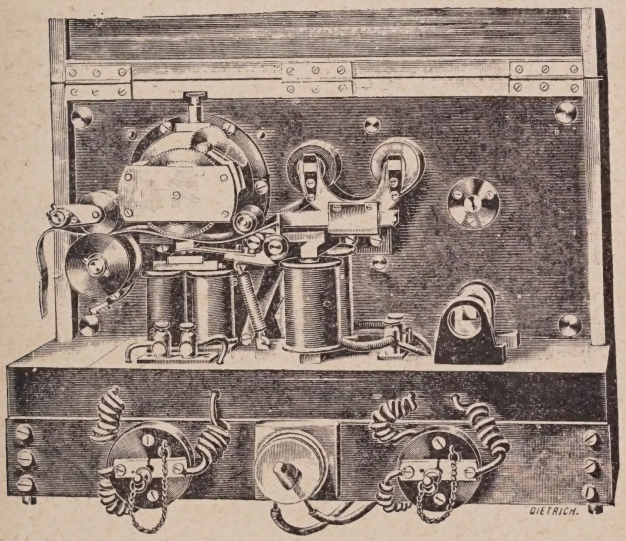


Fig. 42.

imprégné d'encre grasse noire, placée entre les roues et la bande de papier blanc.

Le rouage proprement dit est compris entre deux fortes plaques de cuivre. La plaque antérieure forme cloison entre le rouage et le mécanisme d'impression.

L'appareil repose sur une table rectangulaire en fonte de $0^m,44$ sur $0^m,30$; sa surface est moitié de celle du

chronographe de Hough. Cette table est vissée sur les bras horizontaux de deux potences en fer. Ces deux bras sont réunis à leur partie antérieure par une traverse de fer sur laquelle sont fixés les interrupteurs : à gauche, celui de l'échappement; à droite, celui du mécanisme d'impression; au milieu, celui d'une lampe électrique. La figure 42 montre l'appareil lorsque la caisse qui le recouvre est ouverte, ce qui laisse voir toute la partie du mécanisme relative à l'impression.

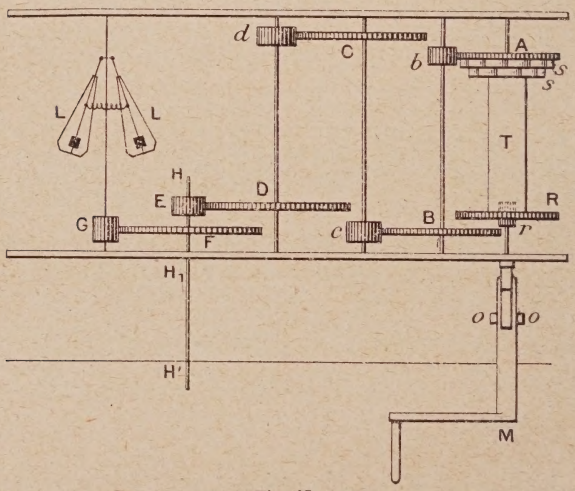


Fig. 43.

Le mouvement d'horlogerie comprend le rouage et la minuterie.

I. La disposition adoptée pour le rouage est celle des horloges. Le schéma (fig. 43) et le tableau ci-après donnent le détail de cette partie du mécanisme :

T, tambour sur lequel s'enroule la corde métallique qui porte le poids moteur;

R, *r*, roue et pignon de remontage;

s, *s*, roues à rochet et à cliquet;

A, roue motrice en relation avec le pignon *b*;

B, *b*, premier mobile et son pignon;

C, *c*, deuxième mobile et son pignon;

D, *d*, troisième mobile et son pignon;

E, pignon d'entraînement (15 dents) de l'axe HH_1H' qui porte la minuterie;

F, roue de commande;

G, pignon du régulateur à ailettes L, L;

M, manivelle de remontage soutenue par l'œilleton circulaire *oo*.

Les roues sont en cuivre, sauf celles du tambour qui sont en bronze. Les axes et les pignons sont en acier, ainsi que la roue de commande.

La corde métallique qui supporte le poids moteur est fixée à l'extrémité antérieure du cylindre T. Elle s'engage dans la gorge d'une poulie P (fig. 44) de $0^m,20$ de rayon située au-dessous de l'appareil, puis sur une poulie de renvoi P' de $0^m,07$ de rayon placée à la partie supérieure de la salle. Le poids moteur M est formé d'une douzaine de rondelles de plomb pesant environ 12 kilos, soit, au total, 144 kilos pour le moteur. La hauteur de chute du poids est de 3 mètres environ, ce qui donne au rouage une durée de marche de près de sept heures sans qu'il soit nécessaire de procéder au remontage. Il est de toute évidence qu'il y aura avantage, lorsque la disposition du local le permettra, à installer l'appareil de manière à éviter les poulies de renvoi.

II. La minuterie comprend, de l'arrière à l'avant :

1° La roue de commande et la roue d'échappement, situées l'une et l'autre en arrière de la cloison de séparation ;

2° La roue des centièmes de seconde ou roue rapide ;

3° La roue des secondes ;

4° La pièce intermédiaire entre la roue des secondes et celle des minutes ;

5° La roue intermédiaire ;

6° La roue des minutes.

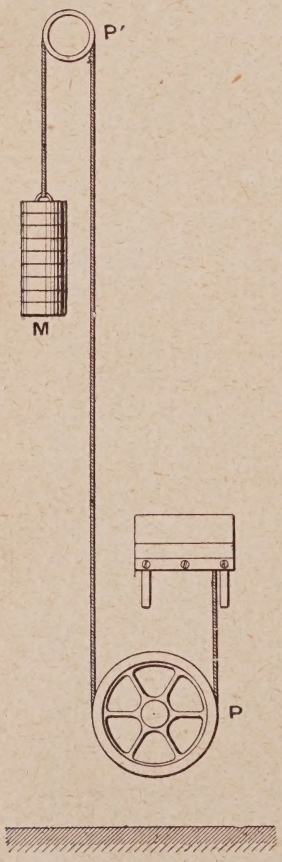


Fig. 44.

Toutes ces roues, sauf la roue intermédiaire, ont leur centre sur l'axe HH_1H' (fig. 43), que nous appellerons l'axe principal. Cet axe est, en réalité, formé de deux parties.

La première est supportée en H par un pont fixé en arrière de la cloison de séparation, et en H_1 par la base d'un cylindre horizontal dans lequel sont enfermées les roues d'impression (centièmes de seconde, secondes et minutes). La seconde partie $H'H_1$ de l'axe principal est formée, ainsi qu'on le verra plus loin, d'une tige cylindrique qui s'emboîte dans la première et est supportée à l'avant au centre de la

seconde base du cylindre. Ce cylindre est évidé longitudinalement dans son tiers supérieur et dans son tiers inférieur, de manière à dégager les roues d'impression en dessus (pour la mise à l'heure) et en dessous (pour l'impression).

Nous allons examiner successivement le rôle des six parties qui constituent la minuterie.

1° La roue de commande (fig. 45) comprend le pignon E de 15 dents engrenant avec le dernier mobile du rouage, et la roue de commande proprement dite formée de deux roues dentées FF, CC soudées l'une à l'autre. Ces deux roues ne font pas corps avec le pignon E d'une façon constante; elles peuvent tourner librement autour de l'axe principal HH_1. La roue non dentée KI (ou roue d'échappement), entraînée avec l'axe, porte un bras II′ soutenant un levier coudé MI′N, mobile autour de I′. Lorsque le doigt Q situé à l'extrémité de la branche I′M est engagé dans une des entailles de la roue CC; la roue FF entraînée avec l'axe actionne le pignon G du régulateur; mais, lorsque le doigt Q est dégagé de la roue CC, c'est-à-dire lorsque le levier est dans la position indiquée sur le côté droit de la figure principale, la roue FF est folle. Il en résulte que le régulateur à ailettes, n'étant plus soumis à l'influence accélératrice du poids moteur, est obligé de dépenser la réserve de force que lui a donnée le moteur pendant le cours d'une révolution.

Il est facile maintenant de comprendre comment s'effectue la synchronisation. A chaque révolution de l'axe, le levier N vient passer sur un plan incliné PP′ qui a pour effet de soulever progressivement de P en P′ le bras I′N, de manière à dégager le doigt Q de

l'une des entailles de la roue CC dans laquelle il était logé. Arrivé en P′, le levier N ne peut franchir ce point que si un buttoir S, porté par le levier LL du contact OO d'un électro-aimant, se trouve abaissé. Le buttoir et le levier sont représentés, sur la gauche de la figure, par leur projection horizontale. Le contact de l'électro-aimant (actionné par une pile de sept éléments Daniell) est attiré à chaque oscillation du pendule de l'horloge synchronisatrice (pendule sans rouage à triple contact, § 25). Imaginons que le levier N vienne de franchir l'arrêt S et que, sous l'action du poids moteur, la roue KI tende à prendre une légère avance; le poids a été calculé pour qu'il en soit ainsi, et, en marche normale, la roue fait un tour en $0^s,988 \pm 0^s,012$. Lorsque le doigt N soulevé par PP′ arrivera de nouveau à la partie inférieure de sa course, il rencontrera le buttoir qui n'est pas encore abaissé. Il y a alors un temps d'arrêt très court, à peine supérieur à $0^s,01$ et absolument comparable au temps de repos de l'échappement d'une horloge. Et, pendant cet arrêt, la roue de commande devenue folle sur son axe n'actionne plus le régulateur, ainsi qu'on l'a vu plus haut. Mais, l'armature de l'électro-aimant venant aussitôt à être attirée, le levier N franchit de nouveau le buttoir S. Ainsi, à chaque seconde sidérale, il y a déclenchement de la roue FF pendant un temps extrêmement court, temps qu'il est possible d'apprécier exactement et que l'on peut réduire à une très faible fraction de seconde ($0^s,008$ à $0^s,012$) en agissant sur les masses du régulateur. Lorsque le doigt Q s'engage à nouveau dans une entaille de la roue CC, il y a reprise du mouvement d'ensemble par le régulateur et par le rouage tout entier.

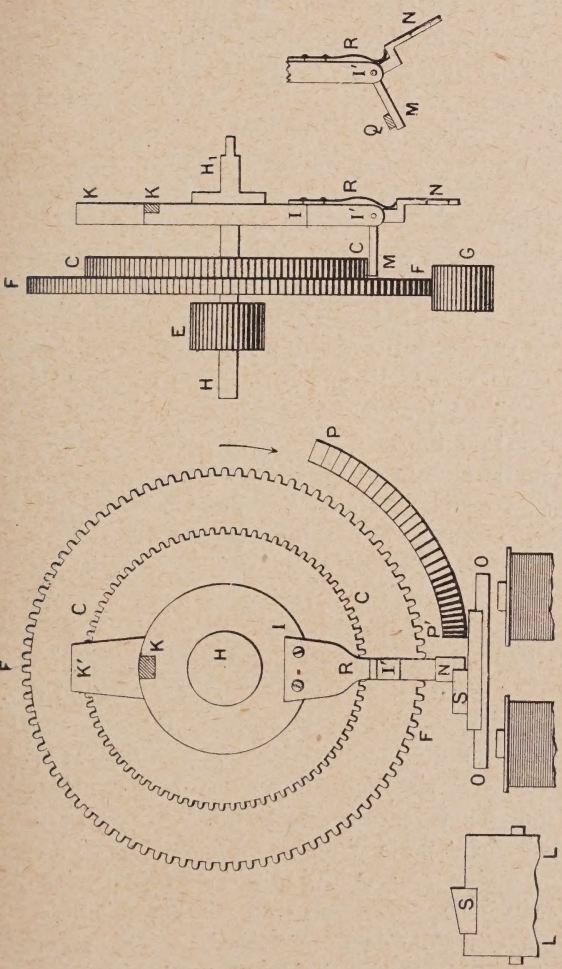


Fig. 45.

Pour faciliter le dégagement rapide du levier N, on a laissé entre le point P′ du plan incliné et l'arrêt S un intervalle ayant à peine moins de largeur que ce levier. De plus, l'arrêt est taillé en biseau, comme le montre la projection horizontale; on évite ainsi le frottement du levier sur le buttoir lorsque N est dégagé et vient à passer devant S. Le ressort R, qui agit sur la branche I′N, oblige le doigt Q à pénétrer immédiatement dans une encoche de la roue CC. Enfin, le levier I′N est garni à son extrémité d'un petit galet qui roule sur le plan incliné (ce galet n'est pas indiqué sur la figure); en substituant un frottement de roulement à un frottement de glissement, on rend le jeu du levier très facile. Le jeu du levier de l'électro est réglé par un ressort et limité par un arrêt en forme d'équerre vissé sur la cloison de séparation.

Il faut remarquer qu'en maintenant le buttoir S abaissé, on soustrait le mouvement d'horlogerie du chronographe à l'action synchronisatrice de la pendule sidérale directrice. En enregistrant alors des tops de minute en minute, par exemple, il sera facile de déterminer l'état de marche de l'appareil, c'est-à-dire son avance ou son retard par seconde. La condition essentielle, indispensable, du bon fonctionnement de l'instrument, est que le mouvement d'horlogerie soit à l'avance : cela résulte du mode même de synchronisation que nous venons de décrire. Au retard, il y a nécessairement perte d'une seconde au bout d'un temps plus ou moins long, et les indications enregistrées n'ont aucune valeur, le retard ne faisant qu'augmenter. Lorsque, par suite de l'usure des huiles et de l'encrassement des pivots, la vitesse n'est plus que d'un tour

en $0^s,995$ ou $0^s,994$, avance insuffisante, on peut commencer à craindre qu'il y ait perte de seconde, et il y a lieu de procéder au nettoyage de l'appareil.

Pour arrêter l'appareil, il suffit évidemment de maintenir l'électro-aimant relevé, en supprimant l'action synchronisatrice (interrupteur de gauche). Le doigt N reste appuyé sur le buttoir S qui ne s'abaisse plus; la roue KI et l'axe HH_1 sont immobilisés. La roue CC tourne autour de H, en entraînant G, par suite de la vitesse acquise ; mais, n'étant plus soumise à l'action du poids moteur, sa vitesse va en décroissant jusqu'à l'arrêt.

L'axe principal HH_1H', l'appareil étant en marche, a donc un mouvement de rotation uniforme, faisant un tour en $0^s,99$, puis subissant un arrêt de $0^s,01$. Nous admettrons dans ce qui suit que cet axe est animé d'un mouvement de rotation uniforme d'un tour par seconde sidérale. Le jeu des autres roues est alors facile à saisir.

2° La roue des centièmes de seconde ou roue rapide DD (fig. 46) est la seule qui ne soit pas libre sur l'axe principal : elle porte une encoche E qui s'engage dans un clavetage situé sur l'axe, de sorte que ce dernier entraîne la roue avec une vitesse d'un tour par seconde.

La tranche de la roue a été divisée en cent parties égales, correspondant chacune à un centième de seconde, et porte des chiffres en relief de $0^{cm},17$ de hauteur numérotés de 00 à 99. Il est inutile de dire que les caractères sont renversés. La partie de la roue qui porte la chiffraison est en bronze. Il en est de même, du reste, pour la roue des secondes et pour celle des minutes.

La roue rapide porte une roue satellite S (fig. 46), c'est-à-dire une roue dont l'axe de rotation n'est pas au centre de la roue principale. Cette roue S est double; en d'autres termes, l'axe S porte deux roues de 20 dents, l'une en avant, l'autre en arrière. Celle

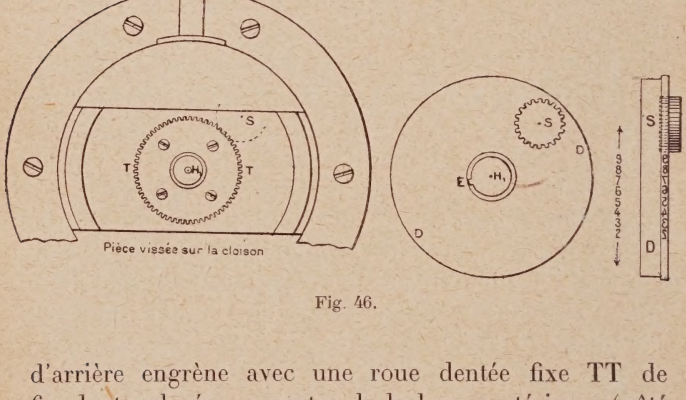


Fig. 46.

d'arrière engrène avec une roue dentée fixe TT de 61 dents placée au centre de la base postérieure (côté des roues) du cylindre vissé sur la cloison de séparation. Celle d'avant engrène avec une roue dentée de 60 dents faisant corps avec la roue des secondes et ayant le même centre qu'elle.

3° La roue satellite S, engrenant avec la roue fixe TT (fig. 46), d'une part, et avec la roue *tt* (fig. 47), qui entraîne la roue des secondes, d'autre part, il est clair que, lorsque la roue des centièmes fait un tour, celle des secondes avance de $\frac{1}{60}$; elle fait donc un tour par minute. La tranche de cette roue a été divisée en

60 parties égales portant la chiffraison de 00 à 59. Les chiffres ont $0^{cm},25$ de hauteur.

La face avant de la roue des secondes porte un

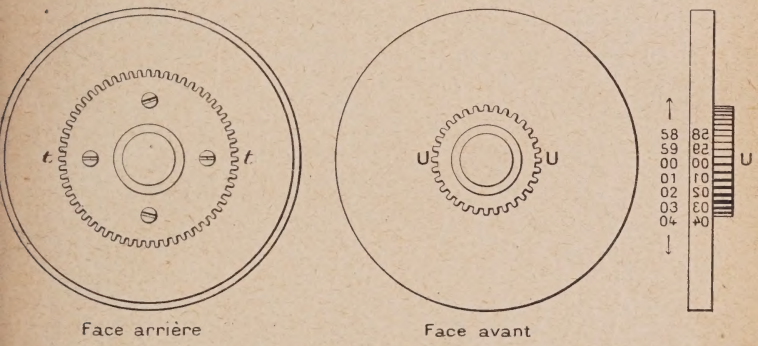


Fig. 47.

pignon UU de 32 dents, qui met en relation cette roue avec les roues de la pièce intermédiaire.

4° Entre la roue des secondes et celle des minutes, se trouve une pièce circulaire (fig. 48) portant un arrêt A, qui s'engage à gauche dans une rainure pratiquée dans le cylindre, de manière à rendre cette pièce immobile. Elle porte sur la face arrière deux roues R_1 et R_2. Dans la figure, il faut considérer ces deux roues comme étant placées en arrière de la pièce circulaire. La première R_1 a 20 dents et elle engrène avec le pignon UU de 32 dents (fig. 47) de la roue des secondes; la seconde R_2 a 32 dents et elle engrène avec la roue R_1.

La roue R_2 porte un pignon P_2 de 18 dents qui s'engrène avec la roue intermédiaire R_3. Cette dernière (représentée en traits sur la figure) met alors en rela-

tion la roue des secondes avec celle des minutes par l'intermédiaire des roues auxiliaires R_1 et R_2 de la pièce fixe. Il est évident que la vitesse de rotation de la roue R_2 est la même que celle du pignon UU, c'est-à-dire, par conséquent, que celle de la roue des secondes. Il en est de même aussi du sens des rotations. Le rôle

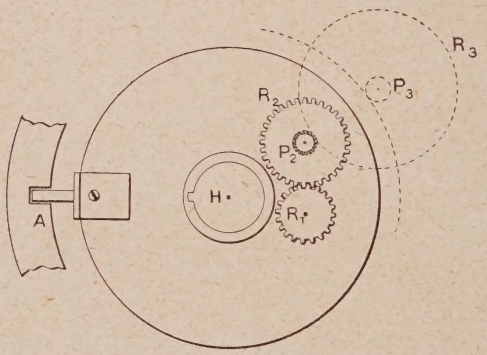


Fig. 48.

des roues auxiliaires R_1 et R_2 est simplement de déplacer le centre de rotation en le relevant.

5° La roue intermédiaire R_3 est située en partie au-dessus du cylindre dans lequel sont placées les autres roues de la minuterie; elle n'a donc pas, comme ces dernières, son centre sur l'axe principal : elle est portée par un axe situé à l'extrémité d'un double bras coudé LL fixé sur le côté droit du cylindre. Les figures 42, 48 et 49 permettent de se rendre exactement compte de sa position et de la façon dont elle relie la roue des secondes à la roue des minutes. Elle a 108 dents, engrène avec le pignon P_2 et porte elle-même un

pignon P_3 de 21 dents. Ce dernier engrène avec la roue des minutes MM.

6° La roue des minutes MM (fig. 49) a 210 dents.

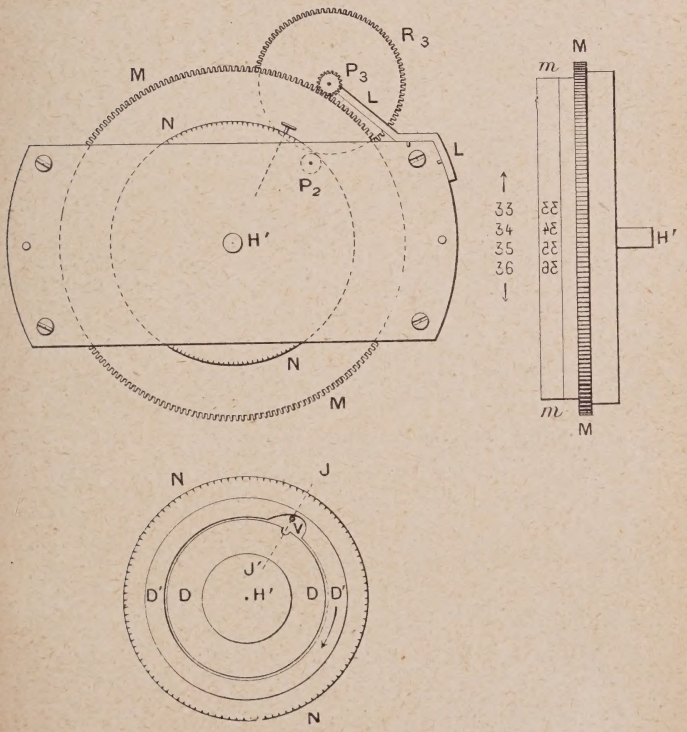


Fig. 49.

Il est facile, d'après ce qui précède, de se rendre compte que sa vitesse de rotation est d'un tour par heure. En effet, appelons v_s la vitesse de rotation de la roue des

secondes (1 tour par minute), et v_m celle de la roue MM. La roue R_2 a la même vitesse que la roue des secondes, et l'on a alors :

$$\frac{v_m}{v_s} = \frac{18}{108} \times \frac{21}{210} = \frac{1}{60}.$$

La partie *mm* de la roue des minutes, qui porte les caractères d'imprimerie (00 à 59), est en arrière de la roue dentée MM. Ces caractères ont $0^{cm},37$ de hauteur. Nous aurons à revenir plus loin sur la manière dont les deux parties MM et *mm* sont assemblées.

Il est important de remarquer que la partie de l'appareil qui porte les roues d'impression, c'est-à-dire toute la minuterie, peut se démonter sans qu'on soit obligé d'enlever les électro-aimants et de déplacer les marteaux. Il est alors extrêmement facile d'effectuer le changement des huiles de cette partie du mécanisme, de beaucoup la plus délicate. Il suffit, en effet, d'enlever les vis qui fixent sur la cloison le cylindre évidé dans lequel se trouvent les roues d'impression. Du reste, il y a rarement lieu d'effectuer ce démontage. L'appareil, affecté à un service continu de jour et de nuit, peut fonctionner trois mois et plus sans qu'on soit obligé de changer les huiles.

Examinons à présent le jeu du mécanisme d'impression, qui comprend :

1° L'impression du papier;

2° Le déplacement des bandes.

Deux bandes de papier BBB, figurées en traits ponctués —. —. —. — (fig. 50), se déroulent automatiquement au-dessous des roues de la minuterie H' (centièmes de seconde, secondes, minutes). La bande supé-

rieure, celle qui se trouve, par conséquent, en contact direct avec les roues, est imprégnée d'encre noire grasse (papier chimique à décalquer); l'autre est en papier blanc. Un levier AOP, mobile autour de l'axe O, porte trois palettes P (une seule est représentée sur la figure) correspondant chacune à une des roues portant

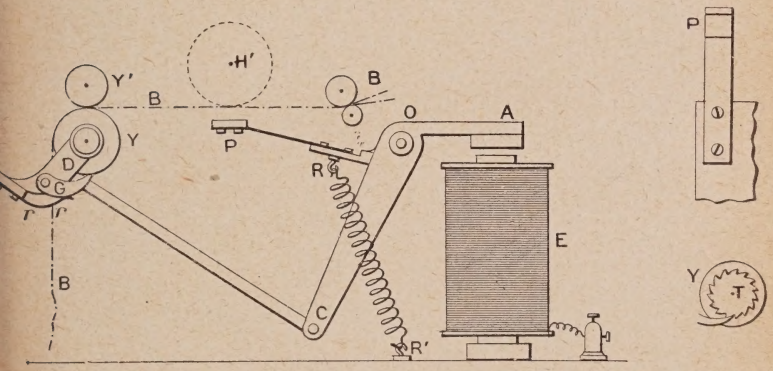


Fig. 50.

les caractères en relief. Ces palettes sont terminées par des patins qui viennent presser fortement les papiers sur les caractères d'imprimerie lorsque l'électro-aimant E attire le contact A. Cet électro-aimant est actionné par quatre éléments Leclanché à grande surface. Un fort ressort à boudin, attaché en R à la branche OP du levier et en R' à la plaque de fonte qui supporte l'appareil, ramène le levier à sa position lorsque l'électro-aimant cesse d'agir sur A. Il n'y a contact des papiers avec les roues qu'au moment de l'établissement du courant. Les palettes, en effet, sont réglées de façon que le choc sur les roues de la minuterie soit instan-

tané et que les patins ne fassent pas frein. Il est très facile de s'assurer que cette condition, qui est indispensable au bon fonctionnement de l'appareil, est réalisée. Il suffit de prolonger le contact d'un top pendant plusieurs secondes. On immobilise les papiers alors que les roues continuent à tourner. Le relevé de la bande ne doit indiquer qu'un chiffre aussi nettement imprimé que si les roues étaient en repos. L'appareil permet d'enregistrer des tops se succédant à $0^s,3$ d'intervalle, au lieu de $2^s,5$ au chronographe Verschaffel.

Une pièce prismatique CC (fig. 51) portant un index I

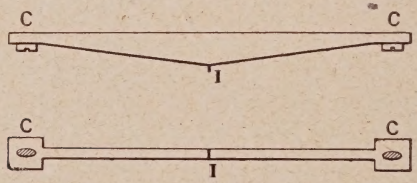
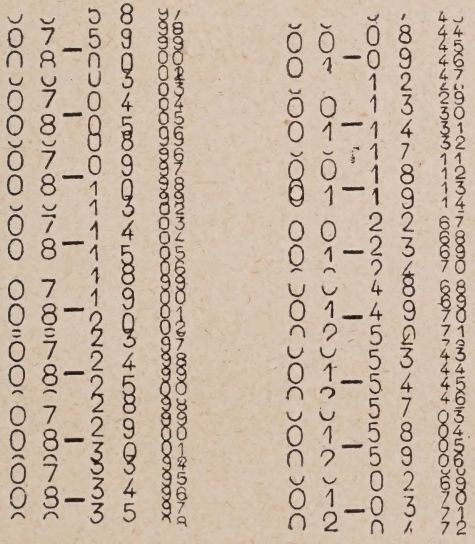


Fig. 51.

est placée entre la roue des secondes et la pièce intermédiaire. La partie inférieure de l'index I est dans le plan horizontal inférieur tangent aux roues d'impression. Le trait imprimé par cet index sur la bande sert de repère pour indiquer les chiffres que l'on doit lire, c'est-à-dire ceux qui correspondent à l'instant du top. La pièce qui porte l'index est montée de façon que le réglage en soit simple. On a allongé pour cela les cavités C, C dans lesquelles s'engagent les tiges des vis de serrage, de manière à pouvoir déplacer aisément la pièce dans le sens de sa longueur. Il peut y avoir une petite différence de temps, quelques centièmes de

seconde, entre l'horloge synchronisante et le chronographe, mais cette différence restera constante. En réalité, le chronographe devient la pendule sidérale à laquelle on rapporte les observations ; et, lorsqu'on déterminera la correction de la pendule par les observations d'astres-repères, c'est la correction du chronographe qu'on obtiendra.

Nous donnons dans la figure 52 (1°) un spécimen de



1° 2°

Fig. 52.

l'enregistrement sur la bande de huit tops donnés de 5 en 5 secondes ; on devra lire la bande en prenant les chiffres situés immédiatement au-dessous du trait de l'index :

RELEVÉ DE LA BANDE	TRADUCTION	DIFFÉRENCE AVEC LA SECONDE EXACTE
08 00 00	8^m. 0^s,00	0^s,00
08 05 05	8 . 5 ,05	+ 0 ,05
08 09 97	8 . 9 ,97	— 0 ,03
08 15 04	8 .15 ,04	+ 0 ,04
08 20 01	8 .20 ,01	+ 0 ,01
08 24 99	8 .24 ,99	— 0 ,01
08 30 00	8 .30 ,00	0 ,00
08 34 97	8 .34 ,97	— 0 ,03

Dans la figure 52 (2°) on a un exemple de l'observation d'une étoile à 8 fils; le relevé de cette bande donne les nombres ci-dessous pour les temps des passages de l'étoile sous chacun des fils.

Grand Instrument méridien. (Observateur : F. Boquet.)
1907 mars 11. α Bélier ($\mathcal{D} = + 23°.1'$).

PASSAGES ENREGISTRÉS

RELEVÉ DE LA BANDE	TRADUCTION	RÉDUCTION FIL A FIL	DIFFÉRENCES AVEC LA MOYENNE
01 09 46	1^m. 9^s,46	36^s,67	— 0^s,02
01 14 31	1 .14 ,31	36 ,63	— 0 ,06
01 19 13	1 .19 ,13	36 ,73	+ 0 ,04
01 23 69	1 .23 ,69	36 ,75	+ 0 ,06
01 49 70	1 .49 ,70	36 ,71	+ 0 ,02
01 54 45	1 .54 ,45	36 ,72	+ 0 ,03
01 59 05	1 .59 ,05	36 ,65	— 0 ,04
02 03 71	2 . 3 ,71	36 ,65	— 0 ,04
	Moyenne	36 ,69	

Nous dirons au chapitre V comment on a obtenu les nombres de la troisième colonne. Les deux spécimens de l'impression sont la reproduction exacte, en vraie gran-

deur, de deux bandes; ils montrent la grande netteté des caractères pour une impression obtenue sur une roue qui fait un tour par seconde, et mettent en évidence la facilité avec laquelle se font la lecture et le relevé des observations.

Le déplacement des bandes, avons-nous dit, est intermittent. Le levier AOP (fig. 50), mobile autour de O, porte un second bras OC articulé en C avec une tige CD. Un cliquet G, maintenu par un ressort *rr*, s'engage dans les dents d'une roue à rochet T de quinze dents. Cette roue fait corps avec un cylindre Y (dit cylindre entraîneur) sur lequel reposent les deux bandes de papier. Un second cylindre mobile Y′, très lourd, maintient les bandes sur le premier; par suite de son adhérence avec les bords des bandes de papier, il tourne avec le cylindre entraîneur. L'axe du cylindre Y′ est porté par un double bras mobile qui permet de le relever quand on veut remplacer les bandes de papier. Lorsque la branche A est attirée par l'électro-aimant, c'est-à-dire quand l'observateur donne un top, le cliquet G est dégagé de la dent où il se trouvait et repoussé dans la suivante où il s'engage. L'attraction cessant, le levier, sous l'action du fort ressort RR′, reprend sa position primitive, et la branche CD ramène en avant le cliquet qui entraîne avec lui le cylindre Y, lui faisant faire $\frac{1}{15}$ de tour. Chaque mouvement du levier d'impression sous l'action du top oblige ainsi le papier à avancer de $0^{m},009$: c'est la distance des traits imprimés par l'index (fig. 52). La partie médiane du cylindre Y′ est d'un plus petit diamètre que les parties des bords; on évite ainsi le frottement du papier noir sur la partie imprimée de la

bande blanche, ce qui rendrait la lecture plus difficile.

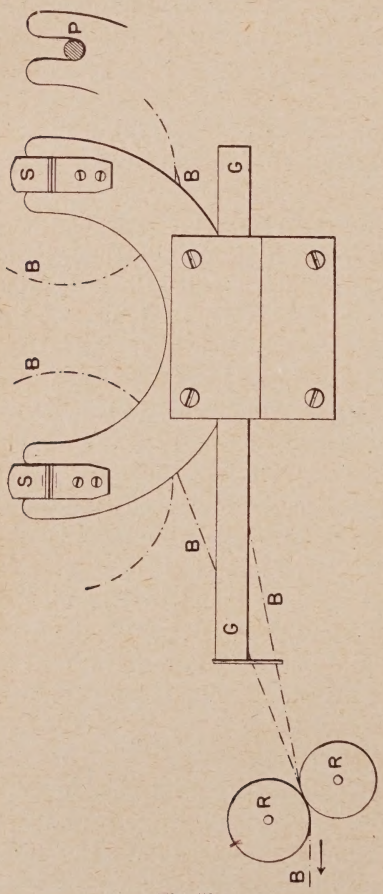


Fig. 53.

Chaque bande de papier est enroulée autour d'un petit cylindre de bois traversé par une broche métallique qui lui sert d'axe de rotation. Les extrémités de deux pièces parallèles en forme d'U (fig. 53) sont creusées à leur partie supérieure, de manière à servir de points d'appui P aux pivots. Deux lames-ressorts S,S, qu'il faut légèrement forcer pour introduire les broches sur leurs appuis, s'opposent à la sortie des rouleaux.

Les deux feuilles de papier BBB (le papier noir au-dessus du papier blanc) s'engagent entre deux petits rouleaux très mobiles R,R, où elles se juxtaposent. La génératrice commune des

deux cylindres R est dans le même plan horizontal que la génératrice supérieure du cylindre entraîneur. Les papiers se trouvent à une très petite distance des caractères en relief des roues de la minuterie. Une glissière GG, placée en avant de la pièce en U, maintient les papiers latéralement. La figure 42 montre nettement la disposition de tout l'ensemble du mécanisme d'impression et du jeu des bandes de papier. On n'a pas cru utile de compliquer l'appareil d'un mécanisme donnant des blancs entre chaque observation : le changement de minute suffit amplement pour éviter toute confusion.

La mise à l'heure s'effectue en agissant sur la roue des secondes et sur celle des minutes.

Pour régler la roue des secondes, on commence par mettre le rouage en marche en plaçant la cheville de l'interrupteur de gauche. On attend pendant quelques secondes que la synchronisation soit établie, ce qui a lieu quand la roue rapide ne subit plus d'arrêt brusque. On suit alors de l'œil la chiffraison de cette roue. Lorsque la division 30 arrive à la partie supérieure (le bord de gauche de la roue R_3 de la figure 49 sert d'index), on baisse le bouton B (fig. 46) situé à la partie supérieure de la pièce vissée sur la cloison. On maintient ce bouton baissé à l'aide d'un arrêt qui tourne horizontalement autour d'un pivot vertical fixé sur la boîte qui recouvre l'instrument. Il est clair qu'alors la division 00 de la roue des secondes est à la partie inférieure. La roue des centièmes de seconde a d'ailleurs été réglée de manière à avoir la division 50 en regard de la division 30 de la roue des secondes, et par suite le 00 en regard du 00. En réalité il peut y avoir dans ce dernier réglage une petite différence de quelques

centièmes; cette différence constante se combine avec celle de la position de l'index pour former la correction du chronographe par rapport à la pendule sidérale, correction qu'il est d'ailleurs inutile de déterminer. C'est l'état seul du chronographe qu'on a besoin de connaître.

La partie inférieure du bouton B (fig. 46) est terminée par un plan incliné qui agit sur la partie A (fig. 54) du

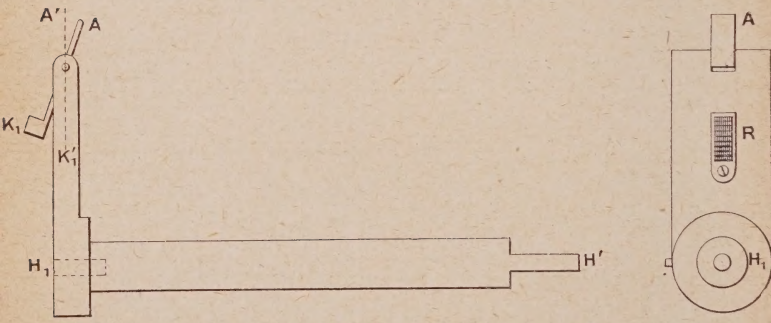


Fig. 54.

levier AK_1 et lui fait prendre (lorsqu'on abaisse B) la position verticale $A'K'_1$, dont il était écarté par le ressort R. Dans la position AK_1, le doigt K_1 se trouve engagé dans la cavité K (fig. 45) de la partie antérieure de la roue d'échappement. Mais dans la position $A'K'_1$, la seconde partie H_1H' de l'axe principal n'est plus soumise à l'action du moteur : il y a désembrayage, et la roue d'échappement ne l'entraîne plus. Le moteur cependant continue à se mouvoir, entraînant la roue de commande d'un mouvement uniforme d'un tour par seconde, l'échappement continuant à agir; mais il est

important d'insister sur ce point; la deuxième partie H_1H' de l'axe principal est immobilisée.

On procède ensuite au débrayage de la roue des minutes, de manière à pouvoir amener à la partie supérieure la division qui correspond à la minute à laquelle on veut mettre l'appareil en mouvement. Si, par exemple, on doit mettre la minuterie en marche à $12^m.0^s$, on amène en face de l'index (bord de gauche de la roue R_3 de la figure 49) la division $12 + 30 = 42$ de la roue des minutes, ce qui se fait aisément en déplaçant la roue avec un doigt, dans un sens ou dans l'autre.

Voici maintenant comment on obtient le désembrayage de la roue des minutes. La partie *mm* de cette roue (fig. 49), qui porte la chiffraison, peut tourner librement dans la partie dentée MM. Elle n'est entraînée par cette dernière que lorsqu'un verrou d'embrayage placé à l'intérieur sur MM est engagé dans une des soixante encoches pratiquées, en regard de chacune des divisions, sur la face intérieure du cylindre qui porte la graduation.

Le bouton moletté NN (fig. 49), placé en avant de la roue MM, entraîne avec lui le cercle D'D' mobile à frottement doux autour du cercle DD. Le jeu du cercle D'D' est d'ailleurs convenablement limité par des arrêts. Imaginons qu'on tourne NN, et par suite D'D', de gauche à droite dans le sens indiqué par la flèche. Une surface courbe formée par un évidement du cercle D'D' agit, par suite de ce mouvement de rotation, sur une petite tige en saillie V faisant corps avec le verrou d'embrayage et oblige celui-ci à se déplacer suivant la direction de la ligne ponctuée JJ' de la même

façon que si l'on agissait directement sur ce verrou pour le déplacer dans le sens de sa longueur. La tige V vient alors se loger dans une entaille du cercle DD. Un ressort ramène le verrou à sa position d'embrayage dès qu'on cesse d'agir sur V en tournant le bouton moletté de droite à gauche. On remarquera que, lorsque la tête de la tige du verrou est apparente, c'est-à-dire quand elle n'est pas engagée dans les parties latérales du cylindre de la minuterie, on peut effectuer l'embrayage et le débrayage en agissant directement sur la tête du verrou; mais l'opération ainsi faite oblige à maintenir le bouton avec le doigt, ce qui présente moins de commodité. Dans les appareils qu'il construit actuellement, M. P. Gautier supprime la tête du verrou : on n'agit alors que par le bouton moletté.

Les roues des secondes et des minutes ainsi réglées, la mise en marche est simple. On attend le battement de la seconde qui précède celle où l'on veut mettre l'appareil en marche, puis on dégage brusquement le bouton B (fig. 46) en ramenant l'arrêt de gauche à droite, de manière à embrayer la seconde partie H_1H' de l'axe principal avec la roue d'échappement. On a reconnu par la pratique qu'il vaut mieux dégager B environ $0^s,6$ à $0^s,8$ avant la seconde choisie. Ainsi, pour mettre l'appareil en marche à $12^m.0^s$, on embraye vers $11^m.59^s,3$. On arrive très facilement à effectuer les opérations du réglage des deux roues et de la mise en marche en moins d'une minute, le placement de la roue des minutes pouvant se faire pendant qu'on suit le mouvement de la roue des secondes.

Le chronographe imprimant, construit par M. P. Gautier en 1901, a été installé à l'Observatoire de Paris

(Grand Instrument méridien) en 1902. L'étude que nous[1] en avons faite ayant montré l'excellence de l'instrument, tant au point de vue de la synchronisation que de ses avantages pratiques, il a été mis définitivement en service à dater du 1er septembre 1903. Depuis cette époque, il a été adopté successivement par les observatoires de Besançon, Toulouse, Nice, et par l'Ecole des ingénieurs de Porto-Alegro (Brésil); le Cercle méridien du jardin, à l'Observatoire de Paris, a été tout récemment muni de cet instrument, ainsi que les Observatoires de Bordeaux, Uccle (Bruxelles), Alger. Aussi nous avons tenu à décrire dans tous ses détails cet ingénieux appareil qui, avant longtemps, sera seul employé dans tous les grands observatoires ayant un service méridien régulier.

37. **Micromètres auto-enregistreurs.** — L'expérience a prouvé, et cela se conçoit presque *à priori*, que l'erreur de pointé d'un fil très fin sur un point lumineux fixe est, sinon nulle, du moins extrêmement faible. Il est beaucoup plus difficile d'estimer avec une exactitude parfaite le moment où un astre qui se déplace dans le champ de l'instrument arrive en coïncidence rigoureuse avec un fil horaire. En imprimant au fil mobile une vitesse égale à la vitesse apparente de l'étoile dans le plan du réticule (vitesse variable avec la hauteur de l'astre) et en permettant à l'observateur, par un dispositif de rappel spécial, d'amener le fil en coïncidence avec l'étoile, on

[1] Boquet, **9**, et Chatelu, **2**, *Bull. astr.*, t. XXII, p. 283; **10**, et Chatelu, **3**, *Bull. astr.*, t. XXIII, p. 86; **11**, et Chatelu, **4**, *Bull. astr.*, t. XXIII, p. 433.

ramènerait ainsi l'estime du passage à celle d'un point fixe. Il y a bientôt un demi-siècle que Wheatstone[1] a indiqué le principe de ce procédé. Le Verrier avait de son côté proposé le problème aux horlogers, et Rédier (1863) a présenté à l'Observatoire de Paris un appareil que M. Wolf a pu examiner. Cet appareil, repris par l'inventeur pour diverses modifications, n'a plus été soumis à l'examen des astronomes. De son côté, le P. Carl Braun revendique la priorité de l'idée (lettre adressée au P. Secchi, en 1861).

Aucun de ces essais, en réalité, n'a donné les résultats qu'on pouvait en attendre. La question fut reprise par Repsold[2] il y a une vingtaine d'années, mais envisagée sous un aspect différent : l'instrument tout entier devait être mobile autour de l'axe polaire. C'était, est-il besoin de le dire, compliquer la solution, et Repsold en revint à l'idée première consistant à maintenir le fil horaire mobile en contact avec l'étoile, soit à l'aide de rappels faits à la main, soit à l'aide d'un mouvement d'horlogerie, procédés qui ont l'avantage de pouvoir s'adapter à toute lunette méridienne.

38. **Micromètre Repsold.** — Le dispositif adopté par Repsold[3] consiste essentiellement en une vis auxiliaire entraînant automatiquement l'oculaire avec le fil mobile, de sorte que ce fil se trouve constamment au milieu du champ. Cette vis auxiliaire est terminée à chacune de ses extrémités, de chaque côté de la boîte

[1] Radau, **1**, *Moniteur scientifique de Quesneville,* 15 novembre 1865, vol. VII, p. 977.

[2] Repsold (J.), **1**, *Astr. Nach.,* vol. CXVIII, col. 305.

[3] Repsold (J.), **2**, *Astr. Nach.,* vol. CXXIII, col. 177, et Repsold (A.), *Astr. Nach.,* vol. CXLI, col. 279.

micrométrique, par des boutons molettés qui permettent à l'observateur d'agir sur la vis avec l'une ou l'autre main, afin de maintenir le fil horaire sur l'étoile. La vis du micromètre est terminée extérieurement par un tambour sur la tranche duquel sont des saillies qui, en appuyant sur un levier, produisent pendant la révolution du tambour des contacts électriques enregistrés sur un chronographe. Le jeu du levier est convenablement limité à l'aide d'une vis de réglage. Un signal plus long indique les tours entiers. Les expériences qui ont été faites dans de nombreux observatoires ont montré qu'on arrive facilement, après un peu d'exercice, à maintenir le fil sur l'étoile. On remarquera que dans ce procédé d'enregistrement automatique il n'y a pas de mécanisme à vitesse variable pour entraîner le fil mobile et l'oculaire. Lorsque, pour une raison quelconque, l'étoile devient difficile à observer, l'observateur peut arrêter instantanément l'enregistrement, puis par un rappel rapide rétablir la bissection. Il n'y a donc pas à craindre de confusion dans l'enregistrement. Enfin pour l'observation des étoiles faibles, on peut, au lieu de bissecter l'étoile avec un fil, la placer à égale distance de deux fils horaires très rapprochés.

Parmi les essais très concluants qui ont été faits de cet ingénieux appareil, nous citerons ceux de M. Becker[1] à l'Observatoire de Strasbourg, de Flint[2] à l'Observatoire Washburn, de M. Albrecht[3] à l'Institut géodésique de Potsdam, de M. Œrtel[4] à l'Observatoire de Munich.

[1] Becker, **1**, *Astr. Nach.*, vol. CXXVII, col. 185.
[2] Flint, *The astronomical Journal*, vol. XX, p. 110.
[3] Albrecht, **2**, *Astr. Nach.*, vol. CLV, col. 33.
[4] Œrtel, *Astr. Nach.*, vol. CLXV, col. 81.

Cependant le maniement de l'appareil devient plus facile en combinant un mouvement d'horlogerie avec le micromètre précédent, de façon que l'observateur n'ait plus qu'à modifier très légèrement la marche du fil horaire mobile pour le maintenir collé sur l'étoile. Les expériences faites par M. Rahts à Kœnigsberg[1] et reprises par M. Cohn[2] semblent absolument concluantes sur les avantages de ce mode d'effectuer les observations de passages.

39. **Micromètre Gautier**. — Le micromètre que M. P. Gautier vient d'installer au Cercle méridien du jardin (Observatoire de Paris) est à mouvement d'entraînement du fil mobile ; la vitesse de ce mouvement est variable et peut être modifiée à volonté par l'observateur. Ce micromètre se compose essentiellement de quatre parties : le moteur, le système de transmission du mouvement suivant l'axe géométrique, le système de transmission au micromètre, le mécanisme de l'enregistrement chronographique.

Le moteur est un moteur électrique qui imprime aux pignons P_1 et P_2 (fig. 55) des rotations de sens contraire. Ces pignons engrènent avec deux roues C_1 et C_2 d'assez grand diamètre ; ces roues tournent évidemment en sens inverse l'une de l'autre. On peut, à l'aide d'une manivelle, agir simultanément sur ces deux roues de manière à les approcher ou les éloigner du plateau circulaire horizontal A porté par l'axe vertical AB. Le déplacement de ces roues parallèlement à elles-mêmes se fait sans qu'elles cessent d'être actionnées par le

[1] Struve (H.), *Astr. Nach.*, vol. CLV, col. 353.
[2] Cohn, 1, *Astr. Nach.*, vol. CLVII, col. 357.

moteur. L'arbre AB, qui porte le plateau A, peut se déplacer verticalement à l'aide d'une vis. Un index I placé en regard de la graduation GG indique la hauteur du plateau par rapport à la ligne des centres C_1 et C_2 des roues d'entraînement. Lorsque les roues C_1 et C_2 sont en contact avec le plateau, celui-ci se trouve par simple pression animé d'un mouvement de rotation d'autant plus rapide qu'il est plus éloigné de la ligne C_1C_2. Toute cette partie est installée sur le pilier Ouest de l'instrument.

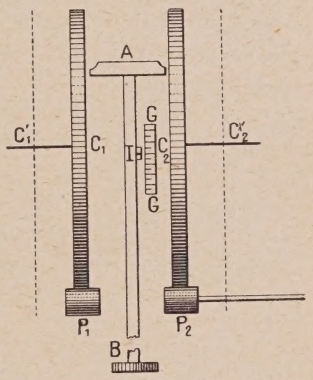


Fig. 55.

La transmission du mouvement de rotation de l'axe AB à un axe parallèle à l'axe géométrique se fait à l'aide d'un système de tiges reliées par des joints à la Cardan et de roues d'angle. La transmission suivant l'axe du tourillon se fait à l'aide d'une roue dentée en relation avec le moteur et engrenant avec une seconde roue en relation avec un arbre dirigé dans l'intérieur du tourillon. La première de ces roues est portée par un levier et peut se dégager à volonté, de façon qu'il n'y ait plus dépendance entre la lunette et le moteur. On peut donc effectuer le retournement de l'instrument, comme nous l'expliquerons plus loin, sans aucune difficulté. Chaque tourillon porte une roue dentée identique, pouvant être mise en relation avec le moteur, de sorte que la transmission se fait de la même façon quel que soit

celui des tourillons qui se trouve du côté du moteur.

La transmission du mouvement au micromètre (fil horaire et oculaire) se fait à l'aide d'une roue d'angle C pouvant engrener soit avec la roue A, soit avec la roue B, suivant la façon dont on veut déplacer l'axe AB. On peut alors obtenir le mouvement dans un sens ou dans l'autre pour se conformer au sens du mouvement des étoiles à observer (passages au-dessus ou au-dessous du pôle). La vitesse imprimée au fil et à l'oculaire par le plateau A (fig. 55) et les systèmes de transmission n'est pas rigoureusement celle de l'étoile. Un différentiel permet de la rectifier de manière que l'étoile une fois sous le fil y reste très sensiblement pendant la durée de l'observation. L'observateur surveille d'ailleurs le mouvement et, en agissant sur le différentiel, maintient la coïncidence. Il semblerait, d'après les premiers essais, qu'il y a avantage, au point de vue de la précision du pointé, à ce que l'observateur soit obligé d'agir sur le différentiel.

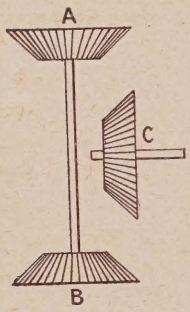


Fig. 56.

Le système d'enregistrement chronographique est le même, en principe, que celui décrit au micromètre Repsold. Le tambour porte huit saillies, dont quatre ont la largeur de la tranche et les autres seulement une demi-largeur. Le ressort-contact peut se placer de façon à toucher les huit saillies à chaque révolution du tambour, ou seulement quatre d'entre elles. Chaque tour complet est indiqué sur la bande par un double contact ($0^s,5$ d'intervalle). A l'équateur, on observe à quatre

contacts seulement, le tambour fait un tour en quatre secondes, l'intervalle des contacts enregistrés est de 1 seconde ; pour les astres dont le mouvement est plus lent, les observations se font à huit contacts. Dans tous les cas, l'astronome peut faire commencer ou cesser l'enregistrement à sa volonté. La description de cet appareil n'a pas encore été publiée, elle sera donnée par M. H. Renan dans le volume des *Annales de l'Observatoire de Paris* (Mémoires, t. XXVII). Les observations d'essai qui ont été faites par MM. Renan, Gonnessiat, Fayet et Lancelin sont d'une précision absolument remarquable, et de plus elles ont montré qu'on arrive aisément à observer des étoiles à deux ou trois minutes d'intervalle, en enregistrant vingt contacts pour chaque objet.

CHAPITRE IV

LES ACCESSOIRES

40. **Niveau.** — Pour déterminer le très petit angle que l'axe des tourillons peut faire avec le plan horizontal, on emploie le niveau à bulle. Pour construire un niveau, on rode suivant une génératrice un tube cylindrique de verre bien calibré, de manière à lui donner intérieurement une courbure circulaire de très grand rayon. On répète cette opération sur toute la périphérie du cylindre, en sorte que la partie intérieure du tube ainsi travaillé est celle du solide engendré par la révolution du trapèze curviligne ABCD (fig. 57) autour de l'axe AD du cylindre. On remplit le tube de liquide, alcool ou mieux éther (l'eau moins mobile aurait en outre l'inconvénient de se congeler aux basses températures), en laissant un vide dont on chasse l'air par ébullition, de façon que la bulle soit uniquement formée de la vapeur du liquide employé. Le tube est ensuite fermé à la lampe ou à l'aide d'obturateurs; la fermeture à la lampe présente le grave inconvénient d'altérer la courbure du niveau aux extrémités. La bulle tend évidemment à se porter à la partie la plus

élevée S de la courbure ; et, si le niveau est placé sur un plan horizontal, l'arête choisie comme étant la mieux travaillée doit partager la bulle en deux parties égales *m*, *m*. Cette arête est divisée en parties égales gravées sur le verre et numérotées. On lit directement les divisions correspondant aux extrémités de la bulle ; la moyenne de ces deux lectures est la lecture correspondant au milieu. Nous apprendrons plus loin à détermi-

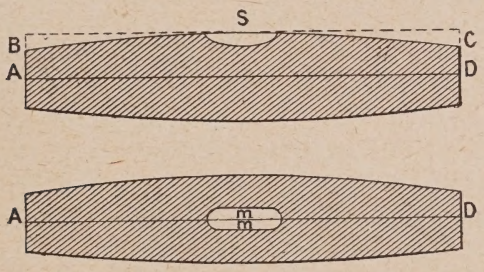


Fig. 57.

ner la valeur d'une partie du niveau, c'est-à-dire la valeur de l'angle dont varie l'axe du niveau quand la bulle se déplace d'une division. Plus le rayon de courbure de la fiole est grand, plus le niveau est sensible, mais il ne faut pas dépasser une certaine limite au delà de laquelle l'instrument deviendrait inutilisable. Il ne faut pas non plus que la bulle soit trop courte, les effets de capillarité la rendraient paresseuse. Le coefficient de dilatation des liquides étant beaucoup plus grand que celui du verre, la bulle a en été une longueur moindre qu'en hiver. Si les dimensions de la bulle ont été mal déterminées, il peut arriver que par les grands

froids elle sorte des limites de la graduation. La fiole est souvent enchâssée dans une gaine cylindrique de laiton, sans pression latérale ni longitudinale, pour éviter toute déformation. Cette gaine présente une fente assez large correspondant à l'arête graduée.

La fiole doit présenter une symétrie parfaite de forme et de matière par rapport à l'axe afin d'éviter les déformations résultant des dilatations. M. Comstock[1] recommande de laver le tube avec un acide, avant de le remplir, pour enlever les parties alcalines du verre; on évite ainsi l'action des impuretés de l'éther qui se déposent sur la fiole ainsi que l'a constaté Oudemans[3]. On a proposé souvent de remplir les niveaux avec d'autres liquides que les liquides volatils.

Piazzi Smyth préconisait l'emploi de liquides pesants, comme plus sensibles, et exposait, en 1855, des niveaux au chloroforme. Le général Tennant[2] pense qu'on pourrait employer le mercure avec avantage. Quel que soit d'ailleurs le liquide employé, il est difficile d'éviter les irrégularités du mouvement de la bulle qui, d'après M. Fœrster[3], doivent résulter des modifications chimiques de la matière employée. On ne devrait employer dans la construction des fioles de niveau que des verres réfractaires et, comme le propose Safarik[3], remplacer l'éther par des carbures d'hydrogène extraits du pétrole, carbures aussi fluides, sinon plus, que l'éther et en outre presque inaltérables. D'après d'Ab-

[1] Comstock, 2, *The sidereal Messenger*, vol. X, p. 299; voir aussi Turner, 2, *Monthly Notices*, vol. LII, p. 52.

[2] Tennant, 1, *The Observatory*, vol. XIV, p. 416, et 2, vol. XV, p. 61.

[3] Fœrster, 1, Oudemans, Safarik, *Vierteljahrsschrift der Astronomischen Gesellschaft*, 18e année, p. 230 et 243.

badie[1] (lettre à M. R. Radau), le niveau à bulle présente deux défauts qui lui ôtent le caractère de précision qu'il devrait avoir : rodée au jugé et plus ou moins régulièrement, la fiole est fermée à la lampe ; elle subit un état de tension moléculaire qui ne peut s'atténuer qu'à la longue, phénomène analogue au déplacement du zéro des thermomètres. Le changement de la valeur des divisions est manifeste quand on les détermine de loin en loin. Et le savant auteur conclut en proscrivant absolument l'emploi du niveau à bulle de toutes les observations de précision. C'était aussi l'avis de Gruey[2]. Ces conclusions sont à notre avis peut-être exagérées. Nous donnerons plus loin un autre procédé de détermination de l'inclinaison de l'axe de rotation d'une lunette. L'astronome a donc un moyen de contrôler souvent, comme le voudrait A. Hall[3], les indications de son niveau ; il peut, au lieu de le supprimer, se rendre compte de la confiance qu'on peut avoir en ses indications.

Des divisions égales de la graduation ne correspondent pas toujours à des différences égales dans l'inclinaison. Pour obvier à ce défaut, M. Turner[4] a proposé une modification à la monture. Il amène la bulle à occuper toujours la même position sur la fiole au moyen d'une vis micrométrique qui permet d'incliner le support. Ce dispositif exige deux fois plus de lectures, mais il élimine les erreurs systématiques de l'échelle. De son côté M. Plummer attribue toutes les difficultés

[1] Abbadie (d'), *Bull. astr.*, t. IX, p. 89.
[2] Gruey, 3, *Bull. astr.*, t. VIII, p. 321.
[3] Hall, 2, *The sidereal Messenger*, vol. X, p. 187.
[4] Turner, 2, *Monthly Notices*, vol. LII, p. 52.

relatives au niveau à l'influence de la température sur la bulle, et propose l'emploi d'une chambre isolante pour le liquide qu'on devrait toujours ramener au même état. M. Bigourdan[1] a mis en évidence le fait que les changements de courbure que subissent certains niveaux à bulle sous l'influence des variations de température sont dus à la réaction de la monture métallique sur la fiole.

Pour faciliter le maniement du niveau, on a adopté des dispositifs variés. Le plus souvent le niveau *nn* est porté par un support horizontal SS (fig. 58 et 59), aux extrémités duquel sont fixés deux bras verticaux ST, terminés par des V renversés. La longueur du support SS est sensiblement égale à la distance des milieux des coussinets, de façon qu'on puisse placer les bras sur les tourillons vers leur partie médiane. Le niveau, dans le cas de la fig. 58, se trouve au-dessous de l'axe; dans le dispositif de la fig. 59, il est au-dessus. Il est amené sur les tourillons soit à l'aide d'un support spécial, soit à la main. Dans quelques observatoires, et notamment à l'Observatoire Washburn, on a adopté un dispositif particulier qui empêche les bras du niveau de peser de tout leur poids sur les tourillons. Il est important d'éviter les secousses qui brisent la bulle, ce qui oblige à attendre qu'elle soit reformée; des chocs peuvent aussi, s'ils sont trop violents, déplacer le niveau dans sa monture. Le niveau placé sur les tourillons doit à très peu près être dans le plan vertical passant par l'axe de rotation. Il prend de lui-même cette position lorsqu'il est au-dessous de l'axe (fig. 58). Dans le cas où

[1] Bigourdan, **5**, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. CXXXIX, p. 385.

il est au-dessus, un doigt *i* (fig. 59), qui s'engage dans une fourchette dont la position est réglée en conséquence, permet de maintenir le niveau dans la situation voulue. Pour faire une lecture, il faut d'abord frapper

Fig. 58.

quelques petits coups sur le bras SS, afin de faciliter le déplacement de la bulle; on attend ensuite quelques instants qu'elle ait pris sa position d'équilibre (une minute suffit le plus souvent), puis on lit les divisions qui

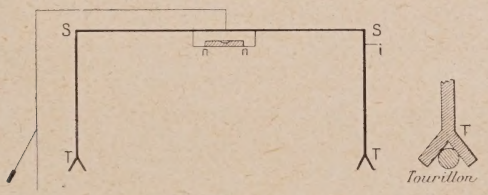


Fig. 59.

correspondent aux extrémités. Il est prudent de lire ces divisions à distance afin d'éviter l'échauffement de la fiole, on emploie pour cela une petite lunette ; si la lecture ne peut se faire de loin, on interpose un carton entre le niveau et la bouche de l'observateur. On doit éviter, pendant l'opération, les courants d'air qui pourraient produire des changements de température. Nous

dirons plus loin (livre III) comment se fait exactement la détermination de l'inclinaison de l'axe ainsi que le réglage du niveau.

Nous avons montré précédemment (§ 18) l'importance que présente la construction des piliers d'une lunette méridienne. Il y a lieu d'y revenir au sujet de la pratique du nivellement. Il est en effet de toute évidence que les trépidations du sol résultant de secousses sismiques ou de vent violent ont une influence marquée sur les nivellements : le 28 septembre 1849, Argelander a constaté des oscillations qui ont duré une demi-heure après une secousse de tremblement de terre de quelques secondes. M. Albrecht[1] a signalé un grand nombre de cas analogues. M. de Rebeur-Paschwitz[2] a relevé à Strasbourg des oscillations ayant persisté plus de dix heures avec des périodes très régulières de deux à trois minutes. Il serait donc très utile d'avoir à côté des instruments méridiens des instruments propres à contrôler les ondulations du sol, souvent corrélatives des changements brusques du nivellement. En dehors des variations irrégulières, on a constaté aussi des changements à périodes fixes. Bessel[3] l'avait remarqué il y a longtemps. Ces variations peuvent être occasionnées par les variations de température des piliers. M. Ellery[4] a constaté qu'à l'Observatoire de Melbourne il se produit chaque jour un mouvement d'abaissement et de surélèvement d'un des piliers par rapport à l'autre. M. Finlay[5] a

[1] Albrecht, **1**, *Astr. Nach.*, vol. CXVI, col. 129.

[2] Rebeur-Paschwitz, **2**, *Astr. Nach.*, vol. CXXXIII, col. 137.

[3] Bessel, **5**, *Abhandlungen*, t. II, p. 19.

[4] Ellery, *Rapport annuel du directeur de l'Observatoire de Melbourne* (1er juillet 1885 au 30 juin 1886).

[5] Finlay, *Annals of the Cape Observatory*, vol. I, 5e partie.

établi qu'au Cercle méridien du Cap de Bonne-Espérance la variation d'inclinaison suit une loi analogue à la loi de variation de la température avec une différence de phase de quatre mois : l'inclinaison serait aussi fonction de la quantité de pluie. A Greenwich [1], on a constaté une variation du niveau dont la période est de 24 heures, avec un maximum vers 6 heures du matin et un minimum vers 6 heures du soir. Ces exemples, qu'on pourrait multiplier, suffisent pour montrer la nécessité absolue de contrôler les indications du niveau par tous les moyens dont on pourra disposer.

41. **Mire**. — La mire méridienne a pour but de fournir un contrôle des variations du plan azimutal de l'axe de rotation d'une lunette. Primitivement la mire était une simple plaque métallique percée d'un petit trou circulaire dont le centre, placé dans le méridien de l'instrument, servait au réglage ultérieur de la lunette. C'est ainsi que les astronomes de l'Observatoire de Paris réglaient autrefois leurs Quarts-de-cercle sur une mire installée à Montmartre [2] ; le pilier de cette mire existe encore à l'heure actuelle. Plus récemment on avait placé deux mires : l'une, en 1800 [3], sur la façade Sud du palais du Luxembourg, était à 1364 mètres de la salle méridienne ; le diamètre du cercle était de 61 millimètres, on le voyait sous un angle de $9''{,}23$; l'autre, en 1806, dans la plaine de Montrouge (actuellement le parc de Montsouris où elle est encore conservée),

[1] Christie, 9, *Monthly Notices*, vol. LXV, p. 749.

[2] Wolf, 6, *Histoire de l'Observatoire de Paris, de sa fondation à 1793*, p. 139.

[3] Le Verrier, 3, *Annales de l'Observatoire de Paris* (Observations), t. I, Préambule, p. x.

était à 1836 mètres de l'Observatoire; l'ouverture avait 68 millimètres de diamètre, correspondant à un angle de $7''{,}64$. Pour que les résultats fournis aient quelque valeur, il est de toute nécessité de placer les mires à une distance très grande : la lunette est destinée à la vision d'objets très éloignés, or le faisceau de lumière utilisé ne peut être considéré comme cylindrique que si la mire est à une distance de plusieurs kilomètres; de plus, les déplacements invisibles du point de visée par suite du jeu des piliers sont rendus beaucoup plus petits apparemment, et le déplacement angulaire décroît en raison inverse de la distance. Mais alors les masses d'air situées entre la mire et la lunette produisent des ondulations considérables résultant de leurs mouvements, de telles masses gazeuses ne se trouvant que très rarement en équilibre. On ne pouvait guère faire les observations que dans le jour, et celles-ci devenaient impossibles par les temps de pluie ou de brouillard. La mire de l'Observatoire du Cap, situé à 13 milles au Nord de la lunette, n'est observable, par temps clair, qu'avant le lever du Soleil ou un peu après son coucher; par temps couvert, mais non brumeux, elle est observable pendant toute la journée. Pour obvier aux inconvénients que nous venons de signaler, Struve[1] a eu l'idée de placer la mire à une distance relativement faible de la lunette, 150 à 200 mètres par exemple. La distance n'a d'ailleurs rien d'absolu : à la Lunette de Gambey (Paris, mire installée en 1852), elle n'est que de 86 mètres; les mires méridiennes de Besançon sont

[1] Struve (F.-G.-W.), *Description de l'Observatoire astronomique central de Poulkovo*, p. 112.

à 50 et 100 mètres, celles d'Heidelberg à 100 mètres; celles de Strasbourg à 150 mètres; la mire du Grand Instrument méridien (Observatoire de Paris) est beaucoup plus rapprochée, 30 mètres environ. Pour réaliser le rapprochement de la mire, Struve interpose entre la mire proprement dite et la lunette une lentille à long foyer, dite objectif de mire. Le point de visée de la mire est placé au foyer même de cette lentille, et les rayons issus de ce point forment à leur sortie un faisceau de rayons parallèles comme s'ils provenaient d'un point situé à l'infini. L'axe optique de la mire est alors la ligne droite qui joint le centre optique de l'objectif de mire au point de visée de la mire, centre de la petite ouverture circulaire.

La mire proprement dite se compose d'une croisée de lames métalliques (fig. 60) percée d'un trou central. Ces lames forment un X dont l'angle aigu est de 60° à 70° environ. Une lampe est placée derrière l'ouverture circulaire. Comme il y a avantage à ce que la mire soit enfermée dans un abri, on a renoncé généralement à l'éclairage de jour à l'aide d'un miroir réfléchissant la lumière du ciel. Lorsqu'on dispose de la lumière électrique, il y a grand avantage à en faire usage, étant donnés le faible échauffement qu'elle produit et la facilité de l'allumage à distance. L'interposition d'une glace dépolie rend l'éclairement plus uniforme. Le système que nous venons de décrire a cependant l'inconvénient de produire quelquefois autour du point lumineux des anneaux de diffraction dont

Fig. 60.

l'intensité varie avec l'éclairage. M. Renan[1] a fait alors modifier le dispositif comme il suit : on a agrandi l'ouverture de la plaque et on y a placé deux couples de fils de platine parallèles, l'un vertical, l'autre horizontal, à une distance telle qu'il est facile d'amener le fil mobile exactement au milieu. Les résultats obtenus au Cercle méridien du jardin de l'Observatoire de Paris ont été des plus satisfaisants.

L'objectif de mire est serti dans un anneau métallique assujetti à un pied qui est lui-même scellé sur l'assise supérieure d'un pilier en pierre. La mire est installée d'une façon analogue. On doit prendre pour l'installation de ces deux piliers les mêmes précautions que pour ceux qui supportent l'axe de rotation de la lunette. Un revêtement en bois, ou même en briques de liège, permet de les maintenir à une température aussi constante que possible. L'objectif de mire et la mire sont enfermés dans des cabanes isolantes qui les mettent à l'abri des rayons du soleil et les soustraient en partie à l'influence des variations de température. Des appareils de réglage permettent de déplacer de petites quantités la mire, l'objectif et la lampe. On doit pouvoir lire nettement avec la lunette des caractères d'imprimerie placés sur l'ouverture de la mire. M. Stroobant[2] a publié un intéressant travail sur l'installation des mires méridiennes des principaux observatoires; nous y renvoyons le lecteur désireux de se rendre compte des conditions essentielles qu'une mire doit

[1] Renan, *Rapport annuel sur l'état de l'Observatoire de Paris pour l'année 1899*, p. 13.

[2] Stroobant, 3, *Annuaire astronomique de l'Observatoire royal de Belgique*, 1904, p. 381.

présenter et des tentatives faites pour lui assurer la plus grande stabilité.

Pour régulariser l'action des rayons solaires sur les couches d'air voisines du sol, on se bornait jusqu'à ces dernières années à gazonner le terrain situé entre la mire et la lunette. Cette précaution est insuffisante, et même à la faible distance de 30 mètres, les mouvements des couches d'air voisines du sol se traduisent souvent par des ondulations de l'image de la mire. Lœwy[1] a eu l'heureuse idée, il y a quelques années, d'interposer entre la mire et la salle où se trouve l'instrument méridien un tube isolant assez large. Au Grand Instrument méridien, ce tube est formé de tiges et d'anneaux de fer, le tout habillé de feutre calorifuge; celui du Cercle méridien du jardin est en ciment armé. Les résultats obtenus sont des plus concluants : les oscillations de la mire sont très réduites et souvent même annulées, la visibilité est améliorée; nous en avons acquis la preuve par nos propres observations.

Dans un grand nombre d'observatoires, les lunettes méridiennes sont munies de deux mires, l'une au Nord, l'autre au Sud; nous citerons entre autres le Cercle méridien du jardin à Paris, les instruments méridiens de Poulkovo, Strasbourg, Nice, etc. On conçoit aisément que, si les pointés sur la mire viennent à subir une variation brusque, il est impossible de savoir, *à priori*, si elle est causée par la lunette plutôt que par la mire. L'emploi de deux mires fournit une indication précieuse : si, en effet, la perturbation provient de la

[1] Lœwy, *Rapport annuel sur l'état de l'Observatoire de Paris pour l'année 1900*, p. 16 et 34. *Idem, pour l'année 1904*, p. 11 et 33.

lunette, elle se retrouvera sur les deux mires, mais avec des signes contraires.

La question des mires lointaines a été discutée à nouveau, il y a une vingtaine d'années, par le Bureau des Longitudes lors de l'installation du grand Cercle méridien de Brunner à l'Observatoire du mont Gros (Nice). De telles mires présentent, outre les avantages signalés, celui de supprimer le pilier de l'objectif de mire. La situation topographique de l'Observatoire de Nice a permis l'établissement d'une mire à $6^{km},5$. Le lecteur trouvera tous les détails relatifs à cette installation dans une intéressante notice de Cornu[1]. Les expériences faites par MM. Jabely[2] et Simonin[2] leur ont permis de mettre en évidence les services qu'une telle mire peut rendre à l'astronomie de précision.

Lorsque l'image de la mire est calme, on peut l'employer à s'assurer que le réticule est bien orienté. Pour cela on amène le fil mobile sur le centre de la mire, puis on fait tourner la lunette sur ses tourillons de manière à déplacer l'image de la mire tout le long du fil. Si le fil mobile est bien dans un plan vertical, il devra, dans ce mouvement de la lunette, rester sur le centre de l'image éclairée. Dans le cas contraire, on tourne le micromètre de la moitié de l'écart constaté lorsqu'on va d'une extrémité à l'autre du champ. Par approximations successives très rapides, on arrive à régler la verticalité du fil mobile. Il est alors facile, par coïncidence avec celui-ci, de s'assurer

[1] Cornu, **5**, *Annuaire du Bureau des Longitudes* (Paris), 1892, p. E, 1. Voir aussi **4**, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. CVII, p. 708.

[2] Jabely, **2**, et Simonin, **2**, *Bull. astr.*, t. XIV, p. 23.

que les autres fils sont normalement fixés sur le cadre réticulaire.

Il n'est pas absolument nécessaire que la mire soit sur la méridienne instrumentale, mais il y a avantage à ce qu'elle n'en soit pas trop éloignée, car il faut que l'image reste dans le champ quand on retourne la lunette en inversant les tourillons. Nous verrons plus loin la raison de cette condition.

42. **Appareil de retournement.** — En principe, l'axe optique d'une lunette devrait être rigoureusement perpendiculaire à l'axe de rotation. Cette condition est rarement satisfaite d'une façon absolue, et l'astronome doit déterminer avec une grande précision l'angle formé par l'axe optique et l'axe géométrique perpendiculaire à l'axe de rotation. Le procédé le plus souvent employé pour effectuer cette détermination consiste à retourner la lunette, c'est-à-dire à mettre à l'Est le tourillon qui était à l'Ouest, et inversement. Voici comment s'effectue pratiquement cette opération à l'aide de l'appareil de retournement. Cet appareil se compose d'un chariot porté sur rails. Au centre se trouve un arbre vertical portant un plateau horizontal bordé d'un cadre dont les dimensions intérieures sont égales à celles des côtés du cube qui unit les tubes de la lunette. Un système d'engrenages mus par une manivelle permet d'élever ou d'abaisser le plateau. Supposons la lunette horizontale (1re position, fig. 61), l'objectif O au Sud. Amenons le chariot sous la lunette dégagée des contrepoids et des galets, soulevons-la lentement jusqu'à ce que les tourillons soient au-dessus des coussinets. Ramenons alors le chariot assez en arrière pour pouvoir, sans être

gêné par les piliers, donner au plateau et, par suite, à la lunette une rotation de 180° dans le plan horizontal (2e position, fig. 61). Par une série d'opérations inverses, on ramène la lunette à reposer sur les coussinets et on replace les contrepoids des galets. Le jeu des différentes parties de l'appareil doit être limité par

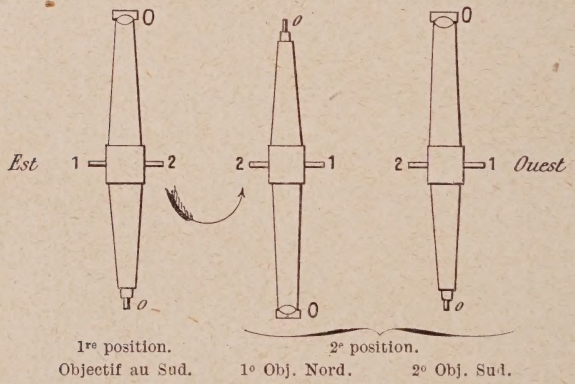


Fig. 61.

des arrêts; on évite ainsi de nombreux accidents à la lunette : chocs des cercles ou des vis en saillie contre les piliers entre lesquels l'instrument se trouve forcément resserré. En opérant alors avec plus de sécurité, on peut aussi procéder avec plus de rapidité, ce qui est un grand avantage au point de vue des déterminations qui exigent le retournement de la lunette. La Lunette méridienne de Cincinnati[1], de 5 pouces d'ouverture, peut se retourner en trois minutes. Une lunette

[1] Porter, *The sidereal Messenger*, vol. VIII, p. 3.

méridienne qu'on peut retourner est dite *réversible;* tel est le cas de la Lunette de Gambey de l'Observatoire de Paris. Le Grand Instrument méridien est *non réversible.* Airy[1] a fait une étude comparative des deux sortes d'instruments. Les imperfections inévitables de la construction d'une lunette, le jeu des différentes parties, font d'une lunette qu'on retourne une nouvelle lunette qui n'est pas absolument et rigoureusement comparable à la première, au moins dans une certaine limite. Les déterminations basées sur le retournement sont donc sujettes à discussion, et il est bon de pouvoir les contrôler.

Les astronomes ont adopté les désignations de *position inverse* (tête de vis du fil mobile d'ascension droite à l'Ouest) et de *position directe* (tête de vis à l'Est) pour distinguer les deux positions que la lunette peut occuper.

43. **Collimateurs horizontaux.** — Pour déterminer l'angle que fait l'axe optique d'une lunette méridienne avec son axe géométrique, on peut, au lieu de retourner la lunette, la pointer sur des collimateurs horizontaux (du latin *collimo,* mauvaise copie du mot *collineo,* je vise ou je mets sur la même ligne; on devrait donc dire collinateur) dont les axes optiques coïncident. Ces collimateurs sont de simples télescopes de Newton (fig. 62) placés dans le plan horizontal de l'axe de rotation sur des supports spéciaux, l'un au Nord, l'autre au Sud. Au foyer *f* de la lentille (ou microscope) LL, se trouve une croisée de deux fils (un fil ver-

[1] Airy, 3, *The Observatory,* vol. VII, p. 132.

tical et un fil horizontal) ; ces fils peuvent être déplacés à l'aide de vis micrométriques. Le cadre qui porte les fils est fixé sur un tube à frottement, analogue à celui qui porte l'oculaire de la lunette méridienne, ce qui permet de placer le réticule au point voulu. L'image des fils vient se former en f' et, renvoyée sur le petit miroir plan *mm* (ou prisme à réflexion totale) à 45°, virtuellement au foyer F du miroir sphérique con-

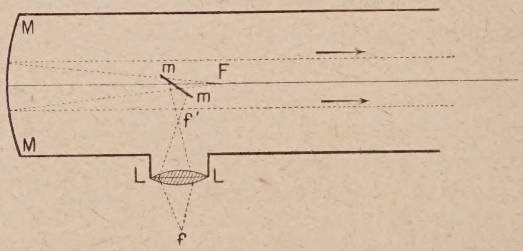


Fig. 62.

cave MM en verre argenté, les rayons issus de ce point sortiront parallèlement ; on aura donc une image observable avec la lunette. Le mouvement du tube autour de son axe permet de régler la verticalité d'un des fils ou l'horizontalité de l'autre. On effectue ce réglage en regardant l'image des fils du télescope avec la lunette, puis en tournant le tube de façon à établir la coïncidence avec les fils du micromètre préalablement réglés. On s'assure d'abord de l'exactitude de la mise au point des fils *f* ; leur image dans la lunette doit être absolument nette. La mise au point peut aussi se faire directement en regardant une belle étoile. Enfin M. Lippmann[1]

[1] Lippmann, **2**, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. CXXIX, p. 569, et **3**, t. CXXXIV, p. 16.

a indiqué tout récemment de nouvelles méthodes pour la mise au point d'un collimateur. Les images gagnent en stabilité si on a soin d'insérer entre le tube métallique et le miroir MM une étoffe de flanelle, procédé indiqué par les frères Henry[1] pour la monture des miroirs de télescope.

Le cube de la lunette méridienne porte, ainsi que nous l'avons dit, deux ouvertures opposées. On dégage la méridienne instrumentale en plaçant la lunette verticalement et en ouvrant ces deux opercules. On peut alors pointer les deux télescopes l'un sur l'autre. Un dispositif imaginé par M. Wolf[2] permet d'établir avec exactitude les coïncidences des fils des télescopes. Sur l'oculaire du microscope, on place une lame métallique noircie M (fig. 63) dont la largeur est environ le tiers du diamètre de l'œilleton. Elle est montée à charnière, de façon qu'on puisse l'abaisser sur l'oculaire ou la relever. La charnière est portée par un collier mobile autour de la monture de l'oculaire, de sorte qu'on peut tourner la lame parallèlement au fil horizontal ou au fil vertical. En regard de l'oculaire et à une distance convenable, on place une source lumineuse S ; entre la flamme et l'œilleton O, on interpose un tube porte-lumière AB. L'objectif A vivement éclairé donne, par l'objectif B, un cercle lumineux sur l'œilleton. On règle la distance de B à l'oculaire O de manière à avoir le maximum de lumière. Si la lame est relevée, on verra dans le collimateur un cercle lumineux et les fils en noir sur fond éclairé ; mais si

[1] Newcomb, 3, *The Observatory*, vol. VII, p. 145, ou aussi 1, *Report to the secretary of the Navy*, 1884, p. 12.

[2] Brunnow, *Traité d'astronomie* (édition française, *Astronomie pratique*), note **, p. 72.

l'on abaisse l'opercule, ce cercle sera coupé en deux par une bande obscure. Plaçons le fil horizontal, par exemple, sous la bande; ce fil, éclairé obliquement par les rayons émanés des deux parties de la flamme, se détachera en un filet brillant sur un fond noir. On obtient un meilleur éclairement des fils brillants en plaçant entre la croisée des fils et le miroir à 45° une couronne métallique qui diffuse la lumière sur la partie des fils tournée vers le miroir. En plaçant la lame à 90°, ce sera le fil vertical

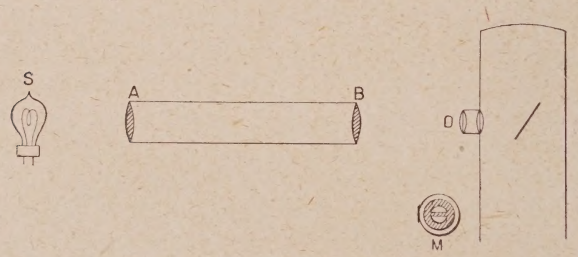


Fig. 63.

qui sera visible. En la mettant dans la position intermédiaire (à 45°), on obtient l'éclairement simultané des deux fils sur fond sombre. Pour source de lumière, il est bon d'employer des lampes à incandescence à verre dépoli : on obtient ainsi un fond lumineux très uniforme. A défaut de verre dépoli, on interposera entre la flamme S et la lentille A une feuille de papier translucide[1].

A l'Observatoire Lick[2], les collimateurs sont des télescopes dont les objectifs ont la même ouverture et le même pouvoir optique que la lunette. On obtient ainsi

[1] Bruck, **2**, *Bull. astr.*, t. XXI, p. 242.
[2] Comstock, **1**, *The sidereal Messenger*, vol. V, p. 225.

une précision plus grande en les pointant l'un sur l'autre, et tout l'objectif de la lunette méridienne est utilisé dans les déterminations qu'on fait avec les collimateurs.

Lorsque le cube de l'instrument ne peut pas s'ouvrir, on est obligé, pour pointer les collimateurs l'un sur l'autre, de soulever l'instrument à l'aide de l'appareil de retournement. L'opération devient longue. Dans les instruments que leurs dimensions ne permettent pas de déplacer, il est absolument nécessaire de pouvoir ouvrir le cube central. Jusqu'en 1866, à Greenwich, on devait opérer par déplacement de la lunette ; à cette époque, le cube central fut percé, mais au lieu d'y pratiquer des ouvertures circulaires, on avait simplement évidé huit secteurs, de sorte que les ouvertures se trouvaient diaphragmées. C'est là une disposition défectueuse, ainsi que l'a montré M. Turner[1]. La différence entre les pointés directs (lunette soulevée) et ceux faits à travers le cube peut dépasser une demi-seconde d'arc. Le désaccord proviendrait d'une différence entre les lignes de collimation des parties centrales et des parties excentriques des objectifs. Cette remarque a conduit Wislicenus[2] à faire des recherches expérimentales sur ce genre de phénomènes. Les conclusions auxquelles il est arrivé sont des plus intéressantes. Les différences sont bien dues à un phénomène optique, les diaphragmes nuisent à la qualité des images et peuvent produire une déviation de l'axe optique. L'ouverture circulaire, si elle est d'un diamètre supérieur à celui des collimateurs, ne produit pas d'effet nuisible.

[1] Turner, *The Observatory*, vol. IX, p. 182; voir aussi 3, *Monthly Notices*, vol. XLVI, p. 329, et vol. LII, p. 146.

[2] Wislicenus, *Astr. Nach.*, vol. CXXVIII, col. 345.

Au Grand Instrument méridien de l'Observatoire de Paris l'ouverture des télescopes collimateurs a 9 centimètres de diamètre, celle du cube central de la lunette 17 centimètres.

M. Bigourdan[1] a indiqué un dispositif qui permet de placer un collimateur à toutes les hauteurs, et qui conviendrait surtout aux petits instruments méridiens.

44. **Collimateur zénithal.** — Le collimateur zénithal imaginé par Faye[2] permet de pointer une lunette exactement sur le zénith. Ce collimateur se compose d'une seconde lunette placée au-dessus de la première et d'un bain de mercure faisant fonction de miroir horizontal. Le réticule du collimateur vu directement par l'oculaire étant amené en coïncidence avec son image réfléchie par le bain de mercure, l'axe optique du collimateur sera vertical, l'objectif se trouvant du côté du nadir. Si, après avoir enlevé le bain de mercure, on vise, à l'aide de la lunette inférieure, la lunette supérieure, on pourra faire coïncider l'axe optique de la lunette méridienne avec celui du collimateur. La lunette sera donc pointée vers le zénith.

Le temps qui s'écoule entre le réglage du collimateur et le moment où on le pointe avec la lunette méridienne est en général assez court pour qu'on puisse admettre l'invariabilité de l'appareil. Pour ne pas gêner les observations zénithales, le collimateur peut tourner autour d'un axe vertical. On peut alors l'amener devant l'objec-

[1] Bigourdan, **4**, *Bull. astr.*, t. XXI, p. 449.

[2] Faye, **1**, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. XXIII, p. 872.

tif de la lunette pointant le zénith ou l'en éloigner à volonté. Nous reviendrons sur ce sujet (§ 69) en traitant des accessoires du cercle méridien.

45. **Écran solaire. Besicles à verre teinté.** — L'observation du Soleil exige absolument qu'on prenne certaines précautions autant pour l'observateur que pour l'instrument. Afin d'éviter l'éclatement des verres du système oculaire et la destruction des fils du micromètre, il faut d'abord diaphragmer l'objectif, surtout dans les instruments de grande ouverture. Pour cela on place sur le collier de l'objectif un diaphragme-écran qu'on fixe à l'aide de vis de serrage. L'écran est formé d'une pièce rectangulaire d'étoffe fixée sur un cadre relié au diaphragme par des tiges métalliques. Le rôle de cet écran est de préserver les tourillons de l'action directe des rayons solaires. Pour équilibrer l'instrument, on fixe près de l'oculaire une masse de même poids que le diaphragme-écran. On préfère quelquefois ne pas modifier l'instrument par l'addition de ces masses; l'écran est alors porté par un appareil spécial placé en avant de la lunette : cet appareil permet de mettre l'écran à la hauteur voulue et de lui donner l'inclinaison nécessaire.

L'observateur doit aussi protéger l'œil avec lequel il observe au moyen d'un verre très foncé. On emploie dans ce but soit un verre enchâssé dans une monture qu'on tient devant l'œil à la façon d'un face-à-main, soit de préférence des besicles à un seul verre, ce qui a l'avantage de laisser à l'observateur la complète disposition des mains pour manier les différentes vis micrométriques et déplacer l'oculaire suivant le bord à observer.

Quelquefois aussi on fixe en avant de l'œilleton une glissière dans laquelle se déplace un verre prismatique (teinte graduée), de manière à amener au degré voulu l'éclat de l'astre.

CHAPITRE V

LES PROCÉDÉS D'OBSERVATION.

46. **Différentes méthodes d'observation de l'heure du passage d'un astre sous un fil.** — La détermination de l'ascension droite d'un astre revient à la détermination très précise de l'heure du passage de cet astre au fil du réticule qui figure le méridien. On y parvient par diverses méthodes.

1° *Méthode de l'œil et de l'oreille par estime des distances ou méthode de Bradley.* — L'observateur, après avoir pris la seconde à la pendule sidérale placée près de l'instrument, continue à la compter mentalement. En même temps, il suit le mouvement de l'étoile dans le champ de la lunette et cherche à en fixer la position à chaque seconde qui lui est donnée par le battement du parleur. Soient a et b les positions de l'étoile (fig. 64) correspondant à deux secondes consécutives comprenant le passage par le fil f. Le rapport de la distance af à la distance ab, généralement évalué au dixième, donnera l'heure du passage en f. Si, par exemple, l'étoile était en a à la seconde 11, en b à la seconde 12, et si l'observateur a estimé que la distance af est les 0,4 de la distance ab, il conclura que l'étoile est passée au fil f à

$11^s,4$. En un mot, on substitue le fractionnement d'une distance au fractionnement d'un temps. Cette méthode exige que l'astronome retienne de mémoire les deux positions de l'étoile en *a* et en *b* pour que l'évaluation qu'il fait ait quelque précision. Or quand l'étoile est en *b* au second battement, l'observateur voit la distance *fb*, mais la dis-

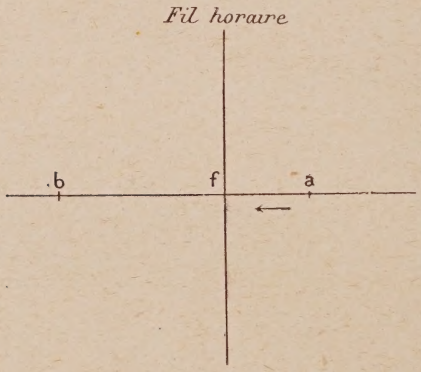


Fig. 64.

tance *ab* n'est plus qu'à l'état de souvenir. Il faut remarquer aussi que la distance *ab* est plus ou moins grande suivant que l'étoile est plus ou moins rapprochée de l'équateur; ce n'est donc pas toujours la même longueur qu'il y a lieu de fractionner. Malgré ces difficultés, on arrive, par l'exercice, à obtenir de bons résultats, et l'emploi de cette méthode a fourni aux astronomes les premiers catalogues d'étoiles fondamentales ayant une réelle valeur scientifique; elle était encore la seule employée à l'Observatoire de Paris il y a une huitaine d'années. M. Lagarde[1]

[1] Lagarde, *Bull. astr.*, t. XII, p. 241.

a cherché à atténuer les imperfections de ce procédé à l'aide d'un dispositif spécial permettant de faire les observations de passages dans des conditions qui favoriseraient sûrement la précision des résultats. Cet appareil n'a pas encore été réalisé ; nous croyons cependant utile d'en donner une description sommaire.

Soit une bande AB (fig. 65) divisée en parties égales,

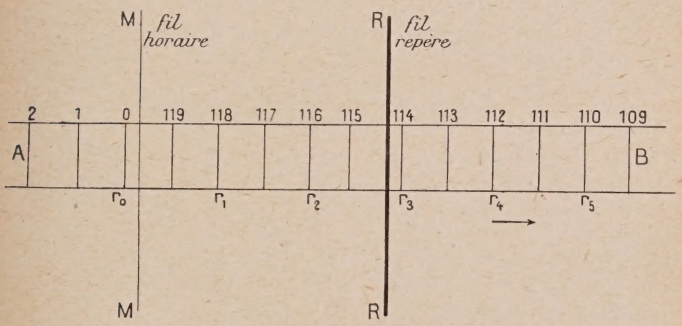


Fig. 65.

animée d'un mouvement uniforme dans un sens quelconque (par exemple, celui de la flèche), et de telle sorte que le passage successif de traits équidistants r_0, r_1, r_2,... en face d'un repère fixe R coïncide avec le battement de la seconde de la pendule méridienne.

Numérotons les traits de telle sorte que le battement de la minute ronde coïncide avec le passage d'un zéro au repère R. Si, par exemple, il passe deux divisions par seconde en R, il faudra numéroter les traits de 0 à 119, puis recommencer.

On obtient ainsi une pendule d'une forme spéciale. Si l'on veut connaître l'heure à un instant donné, il

suffira de noter à cet instant la division de la bande qui se trouve en face du repère R, en fractionnant l'intervalle d'une division s'il y a lieu. On saura que lorsque le zéro précédent de la graduation est passé en R, il était une certaine minute ronde ; comme depuis il est passé un certain nombre de divisions et fractions de division données par la lecture, et qu'on sait de plus le nombre de divisions qui passent par seconde, on en déduira facilement le temps écoulé depuis la minute ronde notée.

Faisons en sorte, maintenant, que la bande, ou son image, se trouve dans le plan du réticule d'un instrument de passages et ait la direction du mouvement diurne, de façon que le fil M du réticule se projette sur la bande parallèlement aux traits. Pour avoir l'heure du passage d'une étoile derrière le fil M, il faudra connaître la lecture de la bande en face de R au moment du passage de l'étoile au fil. Cette lecture ne peut se faire directement, puisqu'on ne peut à la fois voir l'étoile en M et la graduation en R ; mais on arrivera au résultat en lisant la bande en face du fil M et en augmentant (ou en diminuant suivant les cas) cette lecture de la distance de M à R en divisions. Cette distance s'obtiendra facilement et exactement quand la bande sera au repos. On peut donc avoir, par ce procédé, le temps du passage de l'étoile au fil. On voit que, au lieu du fractionnement mental d'un intervalle compris entre deux battements d'une pendule, on a à opérer le fractionnement d'une division *visible* d'une graduation et que l'action de l'œil suffit.

La précision d'une observation dépendra de la précision du fractionnement des divisions de la bande et de

la vitesse de cette dernière. Dans la pratique, il faut que l'étoile soit très voisine de la bande, pour qu'on puisse fixer à la fois l'astre et les divisions.

2° *Méthode de l'œil et de l'oreille par estime du temps.* — Dans cette méthode l'observateur s'applique à assimiler la coïncidence de l'étoile et du fil à un bruit qu'il rapporte aux bruits du parleur lorsque l'étoile est en *a* et en *b*, en rattachant le phénomène de la coïncidence au battement le plus voisin. Ce procédé, qui rappelle celui de la comparaison par estime d'un chronomètre à une pendule, est peu précis et n'est jamais employé dans les observations méridiennes de grande précision.

3° *Méthode électrique.* — Cette méthode est de beaucoup la plus précise. Elle consiste à donner un top (contact électrique) au moment où l'observateur juge que l'étoile, dans son mouvement, arrive en coïncidence avec le fil, phénomène facile à apprécier avec une grande exactitude. L'enregistrement du signal se fait sur un chronographe. Il est important de remarquer que dans cette méthode la mémoire n'intervient pas, et qu'il n'y a pas appréciation de dixième, ce qui lui donne une supériorité incontestable sur la méthode de l'œil et de l'oreille, on le conçoit *à priori*. Dans l'une comme dans l'autre d'ailleurs, il y a action simultanée de deux sens, l'œil et l'oreille dans la première, l'œil et le toucher dans la seconde.

47. **Emploi de plusieurs fils réticulaires.** — La détermination de l'heure du passage d'un astre derrière un fil peut être affectée d'erreurs systématiques et d'erreurs accidentelles. Pour éliminer autant que possible ces dernières, on ne se borne pas à noter l'heure

du passage au seul fil du réticule, qui, jusqu'à présent, était pour nous la représentation matérielle du méridien. Une série de n fils (fig. 66) sont tendus, deux à deux, sensiblement à égale distance du méridien (figuré ou non par un fil f_m). Il est évident que si les distances des n fils au méridien étaient rigoureusement égales deux à deux, comme le mouvement de l'étoile dans le champ

Fig. 66.

est uniforme, la moyenne des temps des passages à tous les fils équivaudrait à n déterminations du passage au fil f_m; on conçoit alors combien la précision serait augmentée. On peut admettre que l'erreur probable du passage d'une étoile équatoriale est, pour un bon observateur, de $\pm 0^s,07$ par la méthode de Bradley; celle de la moyenne d'une observation faite à huit fils serait alors de $\pm \frac{0^s,07}{\sqrt{8}}$ ou $\pm 0^s,025$; à dix fils, elle ne serait que de $\pm \frac{0^s,07}{\sqrt{10}}$ ou $\pm 0^s,022$, erreurs d'ordre inférieur à celles qui peuvent provenir de l'instrument. Au chronographe, où l'erreur probable du passage à un fil

est encore moindre, on voit avec quelle précision on peut obtenir le passage au fil moyen. Il n'y a pas lieu cependant d'augmenter outre mesure le nombre des fils : la fatigue qui résulterait de l'attention trop longtemps soutenue diminuerait sensiblement la précision des passages.

48. **Fil milieu ou fil moyen.** — En général, les distances des fils (pris deux à deux) au méridien ne sont pas absolument égales. Le premier problème qu'on se propose de résoudre en effectuant une détermination d'ascension droite avec une lunette méridienne est de déduire de l'heure du passage de l'étoile à chaque fil l'heure du passage à un fil fictif que nous allons définir. Ce fil idéal sera d'ailleurs très voisin du méridien. Pour fixer les idées, considérons le cas où le réticule est formé d'un nombre pair de fils placés comme nous l'avons dit plus haut. Amenons le fil mobile vertical en coïncidence exacte avec chacun de ces fils, et notons chaque fois la lecture au tambour du micromètre. Imaginons un fil idéal correspondant à la division v_m, moyenne des lectures faites à chaque coïncidence. C'est à ce fil que nous rapporterons les observations, et c'est l'heure du passage à ce fil que nous nous proposons d'obtenir à l'aide des heures des passages successifs de l'étoile aux fils 1, 2,..., n. Pour faciliter le langage, nous appellerons ce fil le *fil milieu* ou le *fil moyen*. Il est extrêmement important de noter que la position de ce fil dépend des positions des fils fixes, et que le déplacement d'un ou de plusieurs des fils du réticule fait varier la position du fil moyen. Mais l'expérience montre que dans un réticule bien construit, qu'il soit à fils d'araignée

ou à lame de verre, le fil milieu reste constant pendant de très longs intervalles de temps, quelquefois pendant plusieurs années. Les distances respectives des différents fils au fil fictif présentent donc un caractère de très grande constance.

49. **Observations faites à tous les fils. Détermination de l'heure du passage au fil moyen.** — Les heures t_1, t_2,... t_i... t_n des passages de l'étoile ont été notées à tous les fils. Pour avoir l'heure du passage au fil moyen, il suffit de prendre la moyenne de ces heures. En effet, soient δ_1, δ_2,... δ_i... δ_n les distances, évaluées en temps, que met l'étoile pour aller des fils 1, 2,... i... n au fil milieu. Nous supposerons le mouvement de l'étoile uniforme, ce qui est rigoureusement vrai pour les étoiles équatoriales et peut être regardé comme très suffisamment exact pour les étoiles autres que les circompolaires ($0^\circ < \mathcal{D} < 3^\circ 30'$). Soit h l'heure du passage au fil milieu et appelons ε_1, ε_2,... ε_i... ε_n les erreurs accidentelles d'appréciation des heures t_1, t_2,... t_i... t_n; on a :

$$h = \delta_1 + t_1 + \varepsilon_1,$$
$$h = \delta_2 + t_2 + \varepsilon_2,$$
$$\cdots\cdots\cdots$$
$$h = \delta_i + t_i + \varepsilon_i,$$
$$\cdots\cdots\cdots$$
$$h = \delta_n + t_n + \varepsilon_n;$$

les distances δ_1, δ_2,... δ_i... δ_n étant affectées du signe + ou du signe — suivant que le fil considéré est avant

ou après le fil fictif. On déduit de ces égalités, en prenant la moyenne :

$$h = \frac{\Sigma \delta_i}{n} + \frac{\Sigma t_i}{n} + \frac{\Sigma \varepsilon_i}{n}.$$

Or le premier terme du second membre est évidemment nul d'après le choix qu'on a fait du fil idéal moyen; quant au troisième, nous le considérons comme nul, puisqu'il représente la moyenne des erreurs accidentelles. On a donc finalement :

$$h = \frac{\Sigma t_i}{n}.$$

5o. **Observations faites à des fils dissymétriques ou à des positions connues du fil mobile. Détermination de l'heure du passage au fil moyen.** — Il arrive assez fréquemment et pour des raisons diverses, disparition de l'astre, mauvaise qualité de l'image, inattention de l'observateur, mauvais fonctionnement du parleur ou du chronographe, etc., qu'on n'a pas noté les heures des passages à tous les fils. Il est cependant possible de tirer parti de ces observations incomplètes et d'en déduire l'heure du passage au fil milieu tel que nous l'avons défini. Le problème à résoudre est le suivant : de l'heure t_i du passage à un fil quelconque i, qu'il s'agisse d'un des fils fixes du réticule ou d'une position déterminée du fil mobile, déduire l'heure du passage au fil moyen; on connaît d'ailleurs la distance, évaluée en temps, que mettrait une étoile équatoriale pour aller du fil i au fil moyen. Avant de résoudre ce problème, nous ferons remarquer que sa solution nous fournira une vérification du cas

précédent. En effet, en appliquant à chaque fil la réduction au fil moyen, nous devrons retrouver pour chaque fil la valeur h aux erreurs ε près.

Supposons que le fil moyen mm (fig. 67) coïncide avec l'intersection du plan méridien et du plan du réticule; nous avons dit qu'il en est très voisin, nous lève-

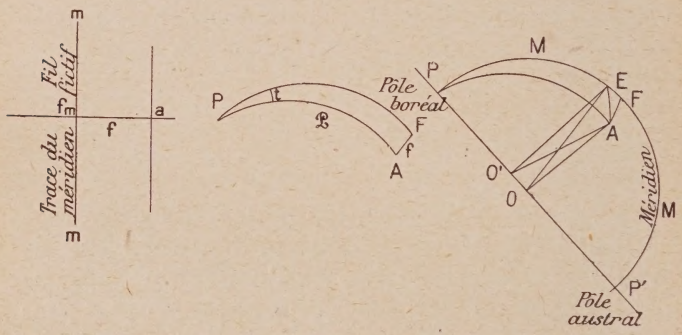


Fig. 67.

rons du reste cette restriction. Soit a la position de l'astre quand il est sous le fil i. L'arc af_m mesure l'arc de grand cercle AF mené par l'étoile A perpendiculairement au méridien MM. Nous voulons évaluer l'angle horaire APF que nous désignerons par t. Appelons $\mathfrak{D}$ la déclinaison de l'astre, complément de la distance polaire $\mathfrak{P} = \mathrm{PA}$, et f l'arc AF. Dans le triangle sphérique APF rectangle en F, on a :

$$\sin t = \frac{\sin f}{\cos \mathfrak{D}}. \qquad (1)$$

Dans le cas où l'étoile n'est pas une circompolaire,

le terme $\frac{1}{\cos \mathfrak{D}}$ n'est pas grand; on peut remplacer les sinus par les arcs et prendre la formule approchée :

$$t = \frac{f}{\cos \mathfrak{D}}. \qquad (2)$$

Ceci revient, en somme, à confondre le parallèle AE décrit par l'étoile avec l'arc de grand cercle AF perpendiculaire au méridien. Soit, en effet, O′ le centre du parallèle AE. L'angle EO′A est l'angle plan correspondant au dièdre EPO′A; il a donc pour valeur l'angle horaire t. Le triangle rectangle AO′O donne :

$$AO' = AO \sin AOO' = R \sin \mathfrak{P} = R \cos \mathfrak{D},$$

en désignant par R le rayon AO de la sphère céleste.

D'autre part, l'arc AE de rayon AO′ a pour expression :

$$AO' \times t \quad \text{ou} \quad R \cos \mathfrak{D} \times t,$$

et l'arc AF de rayon OA :

$$AO \times f \quad \text{ou} \quad Rf.$$

En écrivant, conformément à l'hypothèse précédente, que ces deux expressions sont identiques, on a :

$$Rf = Rt \cos \mathfrak{D},$$

ou :

$$t = \frac{f}{\cos \mathfrak{D}}.$$

Dans la pratique, il faut pour les circompolaires faire usage de la formule générale (1); mais il est alors commode de la mettre sous une forme différente. Remplaçons les sinus par leurs développements en nous limitant au terme du troisième ordre $\left(\sin x = x - \frac{x^3}{6} + \dots\right)$ et

exprimons les arcs en secondes d'arc ($x = x' \sin 1''$); on a :

$$f' - \frac{f'^3}{6}\sin^2 1'' = \left(t' - \frac{t'^3}{6}\sin^2 1''\right)\cos \mathfrak{D},$$

ou :

$$f' = t' \cos \mathfrak{D} - \frac{\sin^2 1''}{6}(t'^3 \cos \mathfrak{D} - f'^3).$$

Dans le second membre de cette expression, nous pouvons, au même degré d'approximation, remplacer f' par le premier terme $t' \cos \mathfrak{D}$ de sa valeur; il vient alors :

$$f' = t' \cos \mathfrak{D} - \frac{\sin^2 1''}{6} t'^3 (\cos \mathfrak{D} - \cos^3 \mathfrak{D})$$

$$= t' \cos \mathfrak{D} - \frac{\sin^2 1''}{6} t'^3 \cos \mathfrak{D} \sin^2 \mathfrak{D}.$$

En secondes de temps, f' et t' deviennent $15f$ et $15t$, et l'on a :

$$15f = 15t \cos \mathfrak{D} - \frac{\sin^2 1''}{6} 15^3 t^3 \cos \mathfrak{D} \sin^2 \mathfrak{D},$$

$$f = t \cos \mathfrak{D} - \frac{\sin^2 1''}{6} 15^2 t^3 \cos \mathfrak{D} \sin^2 \mathfrak{D};$$

d'où :

$$t = \frac{f}{\cos \mathfrak{D}} + \frac{\sin^2 1''}{6} 15^2 t^3 \sin^2 \mathfrak{D},$$

où, en remplaçant t^3 par $\frac{f^3}{\cos^3 \mathfrak{D}}$, $\sin^2 1'' \times 15^2$, par $\sin^2 15''$:

$$t = \frac{f}{\cos \mathfrak{D}} + \frac{\sin^2 15''}{6} \sin^2 \mathfrak{D} \left(\frac{f}{\cos \mathfrak{D}}\right)^3.$$

Pour les étoiles voisines du pôle, $\mathfrak{D}$ est très voisin de 90°; on peut substituer l'unité à $\sin^2\mathfrak{D}$, et on a finalement :

$$t = \frac{f}{\cos\mathfrak{D}} + \frac{\sin^2 15''}{6}\left(\frac{f}{\cos\mathfrak{D}}\right)^3. \qquad (3)$$

Au contraire, pour les étoiles non circompolaires, $\sin^2\mathfrak{D}$ est assez petit pour qu'on puisse négliger le second terme; on retrouve alors la première formule approchée (2).

Dans le raisonnement précédent, nous avons supposé que le fil milieu coïncidait avec la trace du méridien sur le plan du réticule. Soient maintenant *mm* (fig. 68) la trace du méridien, $\mu\mu$ le fil fictif moyen très voisin de *mm*, *a* la position de l'étoile.

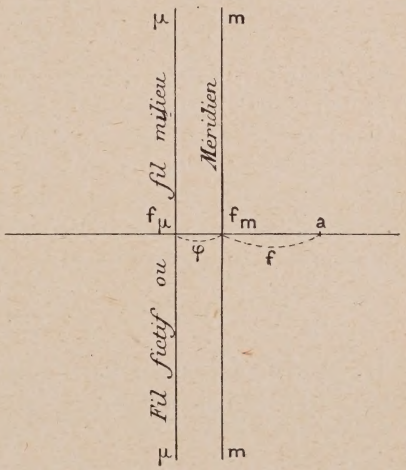


Fig. 68.

Appelons t et τ les angles horaires correspondant respectivement à af_m ou f et à $f_m f_\mu$ ou φ. On a :

$$t = \frac{f}{\cos\mathfrak{D}} + \frac{\sin^2 15''}{6}\left(\frac{f}{\cos\mathfrak{D}}\right)^3,$$

$$\tau = \frac{\varphi}{\cos\mathfrak{D}} + \frac{\sin^2 15''}{6}\left(\frac{\varphi}{\cos\mathfrak{D}}\right)^3.$$

En ajoutant ces deux égalités membre à membre, il vient :

$$t+\tau=\frac{f+\varphi}{\cos\omega}+\frac{\sin^2 15''}{6}\cdot\frac{f^3+\varphi^3}{\cos^3\omega};$$

ou en remplaçant la somme des cubes par le cube de la somme, ce qui revient à ajouter un terme en φ^2 et un en φ, addition qu'il est permis de faire vu la petitesse de φ et celle du coefficient, on a :

$$t+\tau=\frac{f+\varphi}{\cos\omega}+\frac{\sin^2 15''}{6}\left(\frac{f+\varphi}{\cos\omega}\right)^3.$$

La formule (3) convient donc au fil milieu, même si ce fil ne coïncide pas avec la trace du méridien, pourvu qu'il en soit très rapproché. Le raisonnement serait en défaut cependant si f était du même ordre de grandeur que φ, c'est-à-dire si le pointé était très voisin du méridien. Mais dans ce cas, f^3 et φ^3 seraient négligeables, la réduction se ferait avec la formule (2), et l'on aurait :

$$t+\tau=\frac{f+\varphi}{\cos\omega}.$$

51. **Réduction au fil moyen quand l'astre a un mouvement propre.** — La formule (2) ne s'applique pas aux astres qui, comme le Soleil, Vénus, Mercure, etc., ont un mouvement propre assez considérable. Soit $\Delta\alpha$ la variation d'ascension droite de l'astre pour une heure de longitude, temps pendant lequel on peut regarder le mouvement de l'astre comme uniforme. L'arc f compris entre le fil observé et le fil milieu serait décrit en un temps t par une étoile équatoriale, à la vitesse de $v=3600$ secondes (arc évalué en temps) à l'heure (vitesse du mouvement diurne). Les ascensions droites se comptant en sens inverse du mouvement

diurne, le même arc f serait décrit en un temps x par l'astre, à la vitesse de $v' = 3600^s - \Delta\alpha$ (arc évalué en temps) à l'heure (vitesse du mouvement diurne diminué de la variation d'ascension droite en une heure). Dans le mouvement uniforme, les temps employés à décrire une même distance sont en raison inverse des vitesses; on a donc :

$$\frac{x}{t} = \frac{v}{v'}, \qquad x = \frac{vt}{v'},$$

ou bien :

$$x = t\,\frac{3600}{3600 - \Delta\alpha} = t\,\frac{1}{1 - \dfrac{\Delta\alpha}{3600}}.$$

Le terme $\Delta\alpha$ étant très petit par rapport à 3600, on peut remplacer le quotient

$$\frac{1}{1 - \dfrac{\Delta\alpha}{3600}}$$

par

$$1 + \frac{\Delta\alpha}{3600},$$

il vient alors :

$$x = t\left(1 + \frac{\Delta\alpha}{3600}\right).$$

Ainsi, à l'équateur, le temps t deviendrait :

$$t\left(1 + \frac{\Delta\alpha}{3600}\right);$$

par conséquent, pour un astre de déclinaison $\mathcal{D}$, on a :

$$t_1 = \frac{f}{\cos\mathcal{D}}\left(1 + \frac{\Delta\alpha}{3600}\right), \qquad (4)$$

pour la réduction t_1 au fil moyen d'un passage observé à un fil situé à la distance f du fil moyen.

La quantité $\Delta\alpha$ est donnée avec son signe dans les éphémérides, et notamment dans la *Connaissance des Temps*, sous le titre « variation pour une heure de longitude ». Pour le Soleil, cette variation est toujours positive : le Soleil retardera toujours sur une étoile qui aurait coïncidé avec lui au passage au fil observé. Il n'en est pas de même pour les planètes, dont le mouvement apparent est alternativement direct ou rétrograde.

Il est facile de se rendre compte, d'après les valeurs de $\frac{f}{\cos \mathfrak{D}}$ et de $\Delta\alpha$, des cas où l'on pourra négliger le terme correctif $\frac{f}{\cos \mathfrak{D}} \cdot \frac{\Delta\alpha}{3600}$.

52. **Réduction au fil moyen quand l'astre est voisin de la Terre.** — Quand la distance de

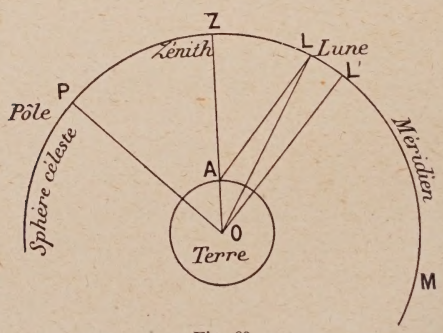


Fig. 69.

l'astre à la Terre n'est pas négligeable, comme c'est le

cas pour la Lune, il y a lieu de modifier la formule (2) en raison de ce fait. En d'autres termes, il faut tenir compte de l'effet de parallaxe. Soient O (fig. 69) le centre de la Terre, A la position de l'observateur, Z le zénith et L la Lune. La distance zénithale méridienne observée ZAL est plus grande que la distance zénithale ZOL rapportée au centre de la Terre. Il en est de même sur le vertical ZLL′ (fig. 70).

Menons (fig. 70) les arcs de grand cercle L′M′, LM

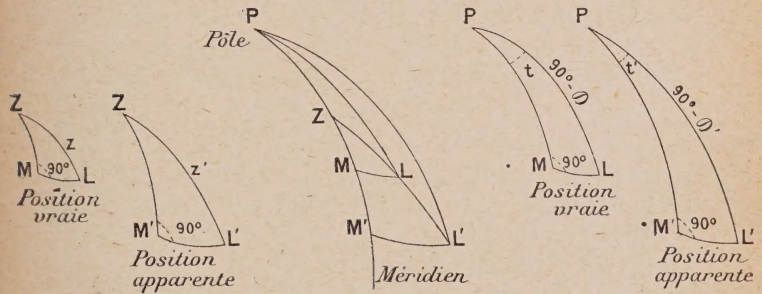


Fig. 70.

perpendiculaires au méridien. L'observateur, s'il était situé au centre de la Terre, aurait à évaluer l'angle horaire MPL, tandis qu'à la surface il a à évaluer l'angle horaire M′PL′.

Soient z et z' les distances zénithales vraies et apparentes ZL et ZL′, $\mathfrak{D}$ et $\mathfrak{D}'$ les déclinaisons vraies et apparentes $90° - PL$ et $90° - PL'$. Les triangles rectangles ZML et ZM′L′ donnent :

$$\sin z \sin MZL = \sin ML,$$

$$\sin z' \sin M'ZL' = \sin M'L' ;$$

d'où, en divisant membre à membre :

$$\frac{\sin z}{\sin z'} = \frac{\sin \mathrm{ML}}{\sin \mathrm{M'L'}}.$$

D'autre part, les triangles MPL, M'PL' donnent les relations :

$$\sin \mathrm{ML} = \cos \mathfrak{D} \sin t,$$
$$\sin \mathrm{M'L'} = \cos \mathfrak{D}' \sin t';$$

d'où, par division :

$$\frac{\sin \mathrm{ML}}{\sin \mathrm{M'L'}} = \frac{\cos \mathfrak{D} \sin t}{\cos \mathfrak{D}' \sin t'} = \frac{\sin f}{\sin f'}, \quad \text{ou} \quad \frac{t}{f}.$$

On a alors :

$$\frac{\sin z}{\sin z'} = \frac{f}{f'}, \quad f = f' \frac{\sin z}{\sin z'}.$$

La valeur f se déduira ainsi de la valeur apparente f' en multipliant celle-ci par le rapport des sinus de la distance zénithale vraie et de la distance zénithale apparente. On aura donc finalement, en tenant aussi compte du mouvement propre de la Lune, l'expression

$$t_2 = \frac{f'}{\cos \mathfrak{D}} \left(1 + \frac{\Delta \alpha}{3600}\right) \frac{\sin z}{\sin z'}, \qquad (5)$$

pour la réduction au fil moyen d'un passage observé à un fil situé à la distance f' du fil moyen, $\mathfrak{D}$ étant la déclinaison géocentrique de la Lune, z' la distance zénithale apparente, égale à la distance zénithale géocentrique z augmentée de la parallaxe.

53. **Distance équatoriale des fils fixes au fil milieu.** — Il est d'une grande importance, d'après ce qui précède, de connaître avec précision la distance des fils fixes du micromètre au fil moyen. La stabilité

des fils permet de ne faire cette détermination que de temps en temps, une fois par semaine par exemple, et d'adopter comme distances les moyennes d'un grand nombre de déterminations. Le procédé généralement employé consiste à amener le fil mobile en coïncidence successivement avec chacun des fils horaires, en faisant à chaque coïncidence la lecture du tambour. Il est bon d'effectuer la coïncidence en déplaçant le fil mobile de l'Est à l'Ouest, puis de l'Ouest à l'Est, en alternant. On fera sur chaque fil une dizaine de pointés. Quelques observateurs préfèrent amener le fil mobile à être tangent au fil fixe, alternativement d'un côté et de l'autre. Soient $v_1, v_2, \dots v_i, \dots v_n$ les lectures du tambour à chaque coïncidence, v_m la moyenne de ces lectures qui donne la position du fil milieu, k la valeur du tour de la vis micrométrique d'ascension droite en secondes de temps. La distance équatoriale du fil i au fil moyen aura pour expression : $k\,(v_m - v_i)$; c'est la quantité désignée par f dans les paragraphes précédents 50, 51 et 52.

54. **Tables de réduction fil à fil.** — Pour faciliter la réduction rapide des observations incomplètes, l'astronome doit avoir à sa disposition une Table de réduction fil à fil donnant les valeurs de

$$t = \frac{f}{\cos \mathfrak{D}}$$

pour chaque fil. Cette Table est à double entrée ; elle a pour argument horizontal les numéros des fils fixes 1, 2, ... i, ... n, et pour argument vertical les déclinaisons $\mathfrak{D}$ (ou les distances polaires $\mathfrak{P}$) de degré en degré. On ne prolonge généralement pas cette Table au delà

de 60° de déclinaison. L'interpolation se fait par parties proportionnelles, en évaluant $\mathfrak{D}$ en dixièmes de degré. La première ligne ($\mathfrak{D} = 0°$) contiendra les valeurs de $k(v_m - v_i)$, la seconde celles de $\frac{k(v_m - v_i)}{\cos 1°}$, etc. En effectuant les calculs par logarithmes, la construction de la Table est assez rapide. Par l'emploi de cette Table, les observations incomplètes se réduisent au fil moyen aussi rapidement que les observations faites à tous les fils.

Cette Table ne convient qu'aux cas où on fait usage de la formule 2 (§ 50). Pour les astres ayant un mouvement propre sensible, formule 4 (§ 51), on devra augmenter chaque valeur de $\frac{f}{\cos \mathfrak{D}}$, fournie par la Table, du terme correctif $\frac{f}{\cos \mathfrak{D}} \cdot \frac{\Delta\alpha}{3600}$. Le multiplicateur $\frac{\Delta\alpha}{3600}$ est d'ailleurs assez petit pour que le produit s'effectue rapidement. En sorte qu'ici la réduction fil à fil est encore très simple.

Il n'en est pas de même dans le cas d'observations incomplètes de la Lune, formule 5 (§ 52). M. Gonnessiat nous a indiqué une méthode excessivement simple qui permet de se servir de la Table de réduction fil à fil. Posons :

$$A = \frac{\sin z}{\sin z'}, \quad B = 1 + \frac{\Delta\alpha}{3600};$$

le multiplicateur de f' peut alors s'écrire :

$$r = \frac{A \cdot B}{\cos \mathfrak{D}},$$

et l'on a :

$$t_2 = f' \cdot r.$$

On établit dans la théorie des parallaxes (voir **E. S.**) la formule

$$A = \frac{\sin z}{\sin z'} = 1 - \rho \sin \pi \cos (\varphi' - \mathfrak{D}),$$

dans laquelle φ' est la latitude géocentrique, ρ le rayon vecteur ou la distance au centre de la Terre, π la parallaxe horizontale de l'astre. Bessel [1] a donné des Tables (*Reductio observationum Lunæ*) destinées à faciliter le calcul de r. Il est plus simple de procéder comme il suit pour avoir la réduction au fil moyen. On calcule deux Tables donnant :

1° $$a = \log A + 0{,}00750,$$

avec $\mathfrak{D}$ et π pour arguments;

2° $$b = \log B - 0{,}00750,$$

avec $\Delta\alpha$ pour argument.

La construction de ces Tables ne présente aucune difficulté ; le nombre 0,00750 a été choisi uniquement de manière à ce qu'on n'ait pas de valeurs négatives pour a et b. En ajoutant a, b et $\log \frac{1}{\cos \mathfrak{D}}$, on aura $\log r$; en effet :

$$a + b + \log \frac{1}{\cos \mathfrak{D}} = \log A + 0{,}00750$$

$$+ \log B - 0{,}00750 + \log \frac{1}{\cos \mathfrak{D}} = \log AB \frac{1}{\cos \mathfrak{D}},$$

c'est-à-dire $\log r$.

[1] Bessel, 3, *Tabulæ Regiomontanæ*, p. LII et p. 537.

Calculons actuellement une déclinaison fictive $\mathfrak{D}_1$, telle que

$$\log \frac{1}{\cos \mathfrak{D}_1} = \log r = a + b + \log \frac{1}{\cos \mathfrak{D}}.$$

La formule (5) s'écrit alors :

$$t_2 = \frac{f'}{\cos \mathfrak{D}_1},$$

et en entrant dans la Table de réduction fil à fil avec l'argument $\mathfrak{D}_1$, nous aurons de suite la réduction au fil moyen.

M. Lagarde nous a communiqué une solution un peu différente du même problème. Soit :

$$A' = \frac{\sin z}{\sin z'} \frac{1}{\cos \mathfrak{D}};$$

on obtiendra la valeur de A' à l'aide d'une Table ayant pour argument horizontal π (de minute en minute à partir de 53′ jusqu'à 61′, limites de la parallaxe horizontale de la Lune) et pour argument vertical la déclinaison $\mathfrak{D}$ de degré en degré (de $-28°$ à $+28°$: l'inclinaison de l'orbite lunaire sur l'écliptique est de 5°9′ en moyenne, et l'angle de l'écliptique avec l'équateur 23°28′). Ayant A', on le multipliera par

$$1 + \frac{\Delta\alpha}{3600},$$

calcul simple, le facteur $\frac{\Delta\alpha}{3600}$ étant petit et compris entre $0^s,027$ et $0^s,047$. La *Connaissance des Temps* donne la valeur de $\Delta\alpha$, non pour une heure de longitude, comme pour le Soleil et les planètes, mais

pour une minute. Au lieu de diviser la variation par 3600, on ne la divisera donc que par 60. Avec la valeur du produit $A'\left(1+\frac{\Delta\alpha}{3600}\right)$, on cherchera, avec une Table de sécantes, l'angle $\mathcal{D}_1$ défini par

$$\text{séc}\,\mathcal{D}_1=\frac{1}{\cos\mathcal{D}_1}=A'\left(1+\frac{\Delta\alpha}{3600}\right),$$

et on procédera, avec cette déclinaison fictive, comme nous venons de l'indiquer. A chaque valeur de $\mathcal{D}$ correspond en un lieu donné une valeur de $\mathcal{D}_1$: on aura donc avantage à doubler la colonne de l'argument vertical de la Table de réduction fil à fil, la première colonne (argument $\mathcal{D}$) pour les étoiles, la deuxième (argument $\mathcal{D}_1$) pour la Lune.

55. **Réduction au fil moyen d'une série de pointés faits sur une circompolaire.** — Le mouvement apparent des circompolaires est trop lent pour qu'on puisse les observer régulièrement aux fils fixes du réticule. On préfère attendre qu'elles soient très rapprochées du méridien, puis on les bissecte avec le fil mobile en notant la lecture du tambour de la vis d'ascension droite et l'heure du pointé. Lorsqu'on observe à l'œil et à l'oreille, on fait en sorte d'effectuer la bissection à une seconde ronde ; dans les observations au chronographe, on donne un top au moment où on juge que la bissection est bien établie. Dans ce dernier mode de procéder, il faut s'exercer à manier la vis d'une main et à donner le top de l'autre. Ayant fait une série de pointés, en général composée de deux groupes de dix pointés chacun, on pourrait réduire chaque pointé au méridien en

faisant usage de la formule (1), ou mieux de la formule (3) (§ 50), et prendre la moyenne des résultats. On préfère le plus souvent procéder d'une façon différente plus rapide.

Considérons d'abord le cas où les m pointés ont été faits assez près du méridien pour que le terme proportionnel au cube de f [formule (3), § 50] soit insensible. Soient h_i l'heure d'un pointé et f_i la valeur correspondante de f; l'heure du passage au fil moyen sera :

$$T = h_i + \frac{f_i}{\cos \delta}.$$

Chaque pointé donnera une valeur de T, et en prenant la moyenne, on aura :

$$T = \frac{\Sigma h_i}{m} + \frac{1}{\cos \delta} \frac{\Sigma f_i}{m}.$$

Si v_i est la lecture du tambour pour le pointé i, v_m celle relative au fil moyen, k la valeur en secondes de temps du tour de la vis d'ascension droite, on a :

$$f_i = k(v_m - v_i),$$

et

$$\frac{\Sigma f_i}{m} = k\left(v_m - \frac{\Sigma v_i}{m}\right);$$

on a, par suite, pour la valeur de T résultant de la moyenne des m pointés :

$$T = \frac{\Sigma h_i}{m} + \frac{k}{\cos \delta}\left(v_m - \frac{\Sigma v_i}{m}\right).$$

Pour un pointé unique, on aurait :

$$T = h_i + \frac{k}{\cos \delta}\left(v_m - v_i\right).$$

En comparant ces deux formules, on voit que pour

réduire les m pointés, il suffit de traiter la moyenne des heures et la moyenne des lectures au tambour comme dans le cas d'un pointé unique.

Lorsque le terme cube est sensible, on pourrait ajouter à chaque valeur de h la valeur du terme en f^3, prendre la moyenne des temps ainsi modifiés, puis corriger cette moyenne comme dans le cas précédent. Soit

$$\tau_i = \frac{\sin^2 15''}{6} \left(\frac{f_i}{\cos (\mathfrak{L})} \right)^3,$$

exprimé en secondes. Posons :

$$h_i + \tau_i = \eta_i ;$$

nous aurons :

$$\mathrm{T} = \frac{\Sigma \eta_i}{m} + \frac{k}{\cos (\mathfrak{L})} \left(v_m - \frac{\Sigma v_i}{m} \right).$$

Cette manière de procéder exige qu'on calcule le terme cube relatif à chaque pointé, aussi elle n'est guère employée. Il est plus simple de prendre la moyenne des temps réellement observés et de la corriger de la valeur moyenne de t [formule (3), § 50]. La moyenne des valeurs du premier terme $\dfrac{f}{\cos (\mathfrak{L})}$ se conclura, comme nous venons de l'indiquer, de l'excès de v_m sur la moyenne des valeurs de v_i. Il restera à évaluer le terme

$$\frac{1}{m} \cdot \frac{\sin^2 15''}{6} \cdot \frac{\Sigma f_i^3}{\cos^3 (\mathfrak{L})} .$$

Pour calculer ce terme, nous supposerons les pointés également espacés, ce qu'on s'efforce toujours d'obtenir dans l'observation des circompolaires. Si cette condi-

tion n'était pas remplie, au moins approximativement, on réduirait chaque pointé individuellement. On a :

$$\Sigma f_i^3 = k^3 \Sigma (v_m - v_i)^3 ;$$

nous allons calculer $\Sigma (v_m - v_i)^3$.

Supposons qu'on ait effectué un nombre pair (fig. 71) 2ν de pointés ; appelons $2p$ l'intervalle constant de deux pointés et α la distance du fil moyen v_m au pointé v_μ du

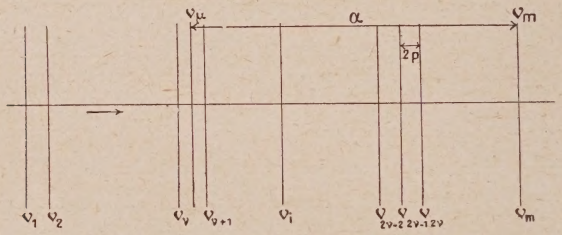


Fig. 71.

milieu, ou plus exactement à la position du tambour pour laquelle le fil mobile partagera en deux parties égales les pointés v_ν et $v_{\nu+1}$. On a :

$$v_m - v_i = \alpha - \big[2\nu - (2i - 1)\big]p \quad \left\{ \begin{array}{l} i \text{ prenant toutes} \\ \text{les valeurs en-} \\ \text{tières de 1 à } 2\nu ; \end{array} \right.$$

et successivement :

$$\Sigma (v_m - v_i)^3 = \Sigma \Big\{ \alpha - \big[2\nu - (2i - 1)\big] p \Big\}^3,$$

$$= 2\nu\alpha^3 + 3\alpha p^2 \sum_{i=1}^{i=2\nu} \big[2\nu - (2i - 1)\big]^2 ;$$

car les termes en p^3 et en p, répondant à des pointés à égale distance de v_μ, sont égaux et de signes contraires ;

donc dans la somme, les termes en α^2 et les termes indépendants de α se détruisent deux à deux. Or la somme Σ, lorsqu'on fait varier i de 1 à 2ν, est égale au double de la somme des carrés des ν premiers nombres impairs. D'autre part, la somme des carrés des ν premiers nombres impairs a pour valeur :

$$\frac{2\nu(4\nu^2-1)}{6},$$

ce qu'on peut écrire :

$$\frac{1}{6}2\nu\left[(2\nu-1)^2+4\nu-2\right].$$

Par suite,

$$\Sigma(v_m-v_i)^3=2\nu\alpha^3+6\alpha p^2.\frac{2\nu}{6}\left[(2\nu-1)^2+4\nu-2\right],$$

et l'on a pour la moyenne :

$$\frac{1}{2\nu}\Sigma(v_m-v_i)^3=\alpha^3+\alpha p^2(2\nu-1)^2+\alpha p^2(4\nu-2).$$

Appelons A l'amplitude, c'est-à-dire la différence des pointés extrêmes; on a :

$$A=2p(2\nu-1),$$

et, en appelant m le nombre total 2ν des pointés, on a, en remplaçant p par sa valeur en fonction de A :

$$\frac{1}{m}\Sigma(v_m-v_i)^3=\alpha^3+\frac{\alpha A^2}{4}+\frac{\alpha A^2}{2(m-1)}.$$

Cette formule est générale et convient au cas où le nombre des pointés est impair. Le raisonnement est le même, mais alors le pointé v_μ est le pointé du milieu.

Le terme correctif sera alors dans tous les cas :

$$\frac{\sin^2 15''}{6}\left(\frac{k}{\cos\mathfrak{D}}\right)^3\left(\alpha^3+\frac{\alpha A^2}{4}+\frac{\alpha A^2}{2(m-1)}\right).$$

Pour une même circompolaire $\cos(\mathfrak{D})$ est constant, le facteur k ne varie que d'un instrument à l'autre, le terme correctif ne dépend que de α et de A. On pourra donc le réduire en Table à double entrée, dont les arguments seront la distance α du fil moyen au pointé du milieu, ou, en d'autres termes, la valeur moyenne de $v_m - v_i$, et d'autre part, l'amplitude ou la durée totale de l'observation. Dans la pratique des observations méridiennes, on ne construit cette Table que pour une circompolaire de déclinaison $(\mathfrak{D})$, α Petite Ourse par exemple. Pour l'appliquer à la réduction des observations d'une autre circompolaire de déclinaison $(\mathfrak{D}')$, on multipliera tous les nombres par le rapport

$$\left(\frac{\cos(\mathfrak{D})}{\cos(\mathfrak{D}')}\right)^3.$$

Lorsqu'on a réparti l'observation d'une circompolaire en plusieurs séries, généralement deux de dix pointés, on doit résoudre à part chaque série par le procédé qu'on vient d'indiquer et prendre la moyenne des résultats de chaque groupe.

La réduction d'une circompolaire pointé par pointé permet de se rendre compte de l'exactitude des pointés; il n'en est plus de même lorsqu'on adopte le dernier mode de réduction. On peut y suppléer en comparant les différences des temps exprimées en secondes. On a, en effet, pour deux pointés consécutifs :

$$T = h_i + \frac{f_i}{\cos(\mathfrak{D})},$$

$$T = h_{i+1} + \frac{f_{i+1}}{\cos(\mathfrak{D})},$$

en négligeant dans cette comparaison les termes en f^3. On en déduit :

$$(h_{i+1} - h_i) \cos \delta = f_i - f_{i+1} = k (v_{i+1} - v_i),$$

ou

$$\Delta h_i \cos \delta = k \Delta v_i,$$

$$\Delta h_i = \frac{k}{\cos \delta} \Delta v_i.$$

Donc en multipliant les différences de pointés par le facteur $\frac{k}{\cos \delta}$, on devra retrouver les différences des heures des pointés, aux erreurs accidentelles près.

Il résulte de la formule 3 (§ 50) que le second terme en f^3 de la réduction a toujours le même signe que le premier. Il n'y a donc lieu de chercher que le signe du terme en f. Il est très facile de se rendre compte qu'on doit prendre pour ce premier terme, lorsque la lunette est dans la position inverse :

$$\mp \frac{k}{\cos \delta} (v_m - v_i) \begin{cases} \text{Pass. sup.} \\ \text{Pass. inf.} \end{cases}$$

et dans la position directe :

$$\pm \frac{k}{\cos \delta} (v_m - v_i) \begin{cases} \text{Pass. sup.} \\ \text{Pass. inf.} \end{cases}$$

Quand on a deux séries de pointés, on reconnaît pratiquement le signe à employer, sans avoir recours à la formule, par la seule condition que les deux résultats s'accordent.

56. **Procédés d'observation.** — A l'exception des circompolaires, les observations de passages se font aux fils fixes, autant que possible aux fils symétriques

adoptés pour la détermination du fil moyen, afin qu'il n'y ait pas de correction à faire pour ramener les observations au même fil idéal. Les moyennes sont aussi plus faciles à calculer : ainsi dans le cas de huit fils, on fera les quatre sommes des fils 1 et 8, 2 et 7, 3 et 6, 4 et 5 ; on en prendra la moyenne qu'on divisera par 2.

Les étoiles, quelle que soit leur grandeur ou leur éclat apparent, sont considérées comme de simples points lumineux. Dans le jour, le champ étant éclairé par la lumière diffuse, il n'est pas possible de régler l'éclairage ; mais la nuit, on devra effectuer ce réglage de manière à voir aussi nettement que possible les fils et l'astre, tout en réduisant l'éclat de ce dernier. Pour les étoiles brillantes, on devra donc donner le maximum d'éclairement. Pour les astres très faibles, on devra, au contraire, faire l'observation aux fils brillants sur champ obscur. Il faut même quelquefois, — c'est le cas de la plupart des petites planètes, — que l'astronome se mette à l'abri de toute lumière extérieure, si faible soit-elle, en s'enveloppant la tête sous un voile à la façon des photographes. Dans ce cas, il doit dicter les résultats de ses observations à un assistant ou les écrire au jugé sur une grande ardoise. Il est nécessaire de donner à l'observateur la seconde après chaque passage. On évite d'ailleurs ces inconvénients avec l'enregistrement chronographique.

On observe le bord le mieux éclairé des astres ayant un disque et dont la phase est variable ; tel est le cas pour la Lune, les planètes inférieures Mercure et Vénus. C'est le premier bord lorsque l'astre passe au méridien entre midi vrai et minuit vrai (passages du Soleil au méridien), le second bord entre minuit et midi. On appré-

cie le moment où le bord est tangent aux fils du réticule. Le bord éclairé de la Lune n'est pas nettement défini, il présente des sinuosités formées par le profil des hautes montagnes de l'astre. M. Franz a proposé, en 1892, d'observer un point bien marqué de la surface, tel que le cratère Mösting A situé près du centre du disque lunaire. Ce cratère, de 6″ de diamètre, est facile à reconnaître ; il est situé un peu au-dessous (fig. 72) des

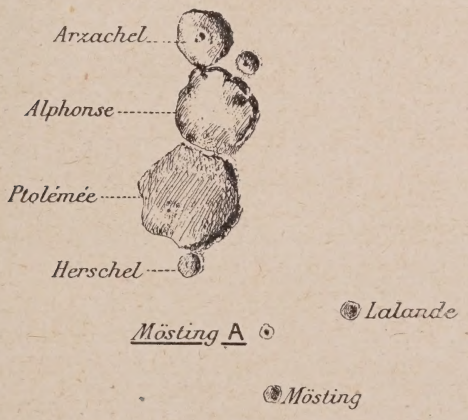


Schéma donnant la position de Mösting A.
Région centrale lunaire, image vue dans la lunette.

Fig. 72.

cratères Herschel et Lalande. Le schéma ci-joint permet de le trouver très aisément, surtout si on a le soin de comparer préalablement le schéma à une carte lunaire de la région.

Le nouveau mode d'observation a été expérimenté

avec succès à Kœnigsberg par M. Franz[1], à Gœttingue par M. Buschbaum, M. Grossmann [2] et M. Schwassmann[3], à Carlsruhe par M. Ristenpart[4], etc. Il faut remarquer que les observations de Mösting, qui ne sont possibles que du premier au dernier quartier, ne peuvent pas remplacer complètement celles des bords, qui peuvent être poursuivies plus longtemps. De plus l'illumination variable du disque lunaire doit produire des différences d'appréciation du point central, sur un cercle de 6″ de diamètre. M. Franz a indiqué un moyen d'éliminer cette influence de la phase. La discussion que M. Franz a faite de ses observations lui permet de conclure que la précision de l'observation de Mösting est deux fois plus grande que celle du passage d'un bord. Cette dernière observation pourrait d'ailleurs être beaucoup plus précise si l'on tenait compte des irrégularités du contour, ce qu'il serait possible de faire à l'heure actuelle si l'on étudiait les aspérités des bords. Grâce aux travaux de M. Franz[5], les constantes de la libration sont connues avec précision ; il est donc possible de donner très exactement les positions relatives du centre de la Lune et du centre du cratère Mösting. Le *Berliner Jahrbuch* publie chaque année les positions relatives de ce cratère et du centre du disque lunaire sous les rubriques

$$\mathcal{R}_{\mathbb{C}} - \mathcal{R}_{\text{crat}}, \ \mathfrak{D}_{\mathbb{C}} - \mathfrak{D}_{\text{crat}}.$$

Lorsqu'on a observé le bord bien éclairé d'une pla-

[1] Franz, **2**, *Astr. Nach.*, vol. CXXII, col. 237; **3**, **4**, **5**, vol. CXXXVI, col. 1, col. 321, col. 353; **6**, vol. CXLIV, col. 177.

[2] Grossmann, **1**, *Astr. Nach.*, vol. CXXXVII, col. 113 et 221.

[3] Schwassmann, *Astr. Nach.*, vol. CXLIV, col. 17.

[4] Ristenpart, *Astr. Nach.*, vol. CXLIV, col. 193 et 215.

[5] Franz, **1**, *Die Konstanten der physischen Libration des Mondes.*

nète, on doit, pour avoir l'heure du passage du centre au fil moyen, ajouter ou retrancher la durée du passage du demi-diamètre suivant le bord observé (premier ou second). Les éphémérides en donnent la valeur en temps sidéral. Dans quelques cas, et cela est assez fréquent pour Mercure, la planète a l'aspect d'une tache blanchâtre qui se distingue à peine sur le fond azuré du ciel ; on observe alors le centre apparent de l'image. Pour avoir la position du centre réel, il y a lieu d'appliquer une correction au passage observé. Nous indiquerons, au sujet des observations de déclinaison, comment on la détermine. Pour les comètes on choisit le point qui semble le centre du noyau.

On observe les deux bords des planètes Mars, Jupiter et Saturne. Au chronographe, l'opération est simple, mais dans le procédé œil et oreille, il faut à chaque fil retenir par cœur le passage du premier bord et ne l'écrire qu'après avoir observé le second. On observe aussi les deux bords du Soleil après avoir pris les précautions que nous avons indiquées. Lorsqu'on a déterminé l'heure du passage au fil moyen des deux bords d'un astre, Soleil ou planète, la demi-somme des temps des deux passages (premier et second bord) donne l'heure du passage du centre de l'astre, car pendant la durée du passage, 2 minutes et demie au maximum pour le Soleil, on peut admettre sans erreur que l'ascension droite varie proportionnellement au temps.

Le disque de la planète Neptune est sensible, mais très petit ; on observe donc cet astre comme une étoile. Celui d'Uranus est quelquefois assez visible et suffisamment accusé pour qu'on puisse observer le bord, cela dépend de l'instrument employé.

Pour obtenir les passages des deux bords d'un astre, on peut, si le micromètre a un assez grand nombre de fils, former deux groupes de fils symétriques, le premier comprenant les fils du commencement et de la fin du champ, l'autre les fils voisins du méridien. On observera un bord au premier groupe, l'autre bord au second. Il y aura lieu de s'assurer que le fil moyen de chaque groupe est le même que celui des fils ordinairement employés, ou corriger de la différence chaque observation de bord.

L'intervalle des temps correspondant aux passages des deux bords au fil moyen est égal au produit du diamètre D de l'astre, évalué en secondes d'arc, par la sécante de la déclinaison et par un facteur fonction de la variation d'ascension droite. Soient, en effet, t_1 et t_2 les heures des passages au fil milieu du premier et du second bord, $\mathfrak{D}$ la déclinaison de l'astre et $\Delta\alpha$ la variation d'ascension droite pour une heure de longitude. Pour avoir le temps que met le disque de l'astre à traverser le méridien ou le fil milieu, il suffit de faire, dans la formule (4) (§ 51), f égal à $\frac{D}{15}$ (diamètre en temps); d'ailleurs, ce temps de passage a pour expression : $t_2 - t_1$; donc

$$t_2 - t_1 = \frac{D}{15} \cdot \frac{1}{\cos \mathfrak{D}} \left(1 + \frac{\Delta\alpha}{3600} \right).$$

Cette formule peut s'écrire :

$$\frac{D}{15} = (t_2 - t_1) \frac{1}{1 + \frac{\Delta\alpha}{3600}} \cos \mathfrak{D},$$

ou :

$$\frac{1}{2}D = \frac{15}{2}(t_2 - t_1)\left(1 - \frac{\Delta\alpha}{3600}\right)\cos\mathfrak{D}.$$

Les éphémérides donnent, pour tous les jours de l'année, la valeur du demi-diamètre de l'astre à son passage au méridien. La comparaison des diamètres observés et calculés fournit la correction du diamètre adopté dans le calcul des éphémérides ; mais ces valeurs, déduites d'observations méridiennes, sont affectées fortement par l'irradiation (agrandissement du diamètre apparent) et diffèrent des valeurs du diamètre basées sur des observations micrométriques. Ainsi la valeur $11'',1$ du diamètre de Mars, adoptée par Le Verrier, répond encore assez bien aux observations méridiennes, alors que la discussion des observations modernes faites par Hartwig conduit à la valeur $9'',4$.

Si, accidentellement, on ne peut observer qu'un des bords, on déduit le passage du centre en ajoutant ou en retranchant la demi-durée du passage du diamètre, suivant le bord observé. Mais le résultat ainsi obtenu est affecté de l'incertitude de la valeur du demi-diamètre, incertitude qui affecte toujours les observations du Soleil, de la Lune et des planètes inférieures. M. Thackeray estime que pour les observations du Soleil faites à un seul bord il serait préférable d'adopter une valeur du diamètre propre à l'observateur, au lieu de la valeur moyenne tirée des éphémérides.

Lorsque nous traiterons de la détermination des distances polaires, nous dirons de quelles précautions l'astronome doit s'entourer pour avoir des images aussi

calmes que possible. En principe, il faudrait s'efforcer d'obtenir autour de l'instrument un air immobile et une température uniforme. Ces conditions sont assez difficiles à réaliser. Pour y suppléer et éviter la formation de couches gazeuses de densités différentes, M. Langley propose au contraire d'agiter vivement l'air autour de la lunette. Cette manière de procéder, appliquée aux observations du Soleil, a donné d'excellents résultats.

LIVRE II

LE CERCLE MÉRIDIEN

CHAPITRE I

LE CERCLE

57. **Disposition des cercles méridiens.** — Pour évaluer le déplacement angulaire de l'axe optique d'une lunette méridienne dans le plan méridien, on adapte à l'instrument un cercle très soigneusement divisé. Ce cercle est perpendiculaire à l'axe de rotation avec lequel il fait corps; son centre est sur cet axe. Les déplacements du cercle par rapport à un repère fixe ou *index* permettent de déterminer l'angle dont a tourné la lunette pour passer d'une position à une autre. Soient, par exemple, l_p et l_e les lectures à l'index lorsque l'axe optique est pointé sur le pôle et sur une étoile; la distance polaire de l'astre sera la différence des deux lectures : $l_p - l_e$ ou $l_e - l_p$, suivant le sens de la chiffraison du cercle.

Les instruments méridiens peuvent se rapporter à

deux types : les instruments réversibles et les instruments non réversibles. Ces derniers sont surtout construits en vue d'obtenir une puissance optique considérable, ce qui exige de donner à la lunette de grandes dimensions. Tel est le Grand Instrument méridien de l'Observatoire de Paris, construit par Secrétan et Eichens, sous la direction de Le Verrier, et destiné à l'observation des petites planètes. Les cercles méridiens construits actuellement par MM. P. Gautier, Repsold, etc., sont généralement du premier type. Ces instruments portent le plus souvent deux cercles symétriquement placés par rapport au méridien; l'instrument est alors dit symétrique, surtout lorsqu'il existe un repère de lecture pour chaque cercle. Les cercles muraux, dont l'axe de rotation ne tourne que dans une douille placée d'un seul côté du cercle, ne sont plus guère employés. Le lecteur qui voudrait avoir une description complète de ce genre d'instruments pourra lire le mémoire d'Y. Villarceau[1].

58. **Cercle de calage.** — La première opération à faire pour observer un astre est de pointer et de fixer la lunette sur l'objet, au moins approximativement, de manière à pouvoir le reconnaître lors de son passage dans le champ à une heure déterminée. On peut pour cela se servir des cercles gradués; mais il ne serait pas sans inconvénient de fixer la lunette sur ces cercles, à cause des pressions qu'il faut exercer et des déformations temporaires ou permanentes qui peuvent en résulter. C'est cependant ainsi que se fait le calage du Cercle

[1] Yvon Villarceau, **2**, *Annales de l'Observatoire impérial de Paris* (Observations), t. XII, p. 61.

méridien de l'Observatoire Lick, comme pour les cercles muraux de Gambey. Mais, en général, les constructeurs préfèrent fixer sur l'axe un cercle spécial, dit de calage, à l'aide duquel on peut sans crainte immobiliser la lunette dans la direction choisie; ce cercle peut être pris dans une mâchoire commandée par une tige-manette. Une seconde manette, que l'observateur peut amener à sa portée dans les différentes positions qu'il aura à occuper, permet de donner à l'instrument de très petits déplacements angulaires, en agissant sur une vis de rappel portée par la pince de serrage. Il faut avoir soin de s'assurer que la pince, lorsqu'elle est serrée, n'exerce sur l'instrument aucune pression qui puisse modifier la direction azimutale de l'axe. On le fera aisément à l'aide d'un collimateur. Le cercle de calage est gradué comme le cercle de lecture, soit de 5′ en 5′, soit de 2′ en 2′; un vernier permet d'évaluer la minute avec assez de précision. Le zéro de ce cercle doit correspondre au zéro du cercle gradué, à moins que celui-ci ne soit susceptible de tourner sur l'axe et d'y occuper diverses positions au gré de l'observateur. La disposition de l'instrument permet rarement de lire directement le cercle de calage : on fait alors la lecture à distance avec un viseur. C'est une lunette coudée avec prisme à réflexion (45°) au coude. La partie qui porte l'oculaire est perpendiculaire à l'axe du viseur et mobile autour de cet axe. De cette façon, l'observateur peut maintenir l'œil à l'oculaire du viseur, tout en se déplaçant pour amener la lunette méridienne à la direction voulue. Une lampe éclaire la chiffraison en regard de l'axe du viseur.

On a employé pour le calage des lunettes méridiennes

proprement dites un système différent qu'il est utile de connaître, un certain nombre d'instruments en étant encore pourvus. Près du micromètre, sur le côté du tube voisin de l'oculaire o (fig. 73), se trouve un cercle CC dont le plan est parallèle au méridien. Ce cercle est gradué en demi-degrés, par exemple, et un vernier V au trentième, placé à l'extrémité d'un diamètre mobile DD, donnera la minute d'arc. Un niveau à bulle N repose sur ce diamètre. Une vis de serrage *v* permet de fixer le diamètre sur le cercle, et par la vis de rappel T, on peut lui donner de petits déplacements. Supposons que le calage se fasse sur la hauteur, c'est-à-dire que la ligne 0° — 180° du cercle soit parallèle à l'axe instrumental. Pointons la lunette sur l'horizon Sud et amenons le o du vernier sur le o du cercle : la bulle sera au milieu de la graduation du niveau. Pour viser un astre à une hauteur déterminée, il suffira de mettre le o du vernier sur la division voulue, de fixer et de faire tourner la lunette jusqu'à ce que la bulle soit au milieu du niveau. On l'y amène approximativement par une rotation rapide et on rectifie par de légers chocs, donnés avec le doigt, sur le tube. Par symétrie, on place deux cercles l'un à l'Est, l'autre à l'Ouest, dispositif qui a l'avantage de permettre d'effectuer le calage toujours du même côté, que la lunette soit dans la position directe ou dans

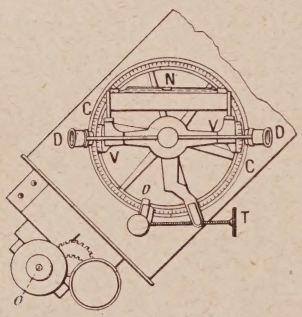


Fig. 73.

la position inverse. L'inconvénient de ce système, c'est de pointer la lunette sans la caler ; il est donc important, pendant l'observation, de ne toucher aux vis du micromètre que très légèrement.

Les éphémérides donnant la distance polaire $\mathfrak{P}$ ou la déclinaison $\mathfrak{D}$, on aura la hauteur h par l'une des formules :

$$h = 180^\circ - \lambda - \mathfrak{P},$$

$$h = 90 - \lambda + \mathfrak{D},$$

dans lesquelles λ désigne la latitude du lieu (hauteur du pôle).

59. **Cercles gradués ou cercles de lecture.** — Les cercles gradués sont, avons-nous dit, fixés sur l'axe de rotation. Entraînés avec la lunette, ils se meuvent en face d'un index qu'on place le plus souvent de manière que le zéro corresponde très approximativement à la direction de la lunette vers le pôle. Cependant quelques astronomes préfèrent pouvoir déplacer de temps en temps les cercles sur l'axe de rotation. Les cercles de Repsold, à l'Observatoire d'Uccle, à l'Observatoire Lick, peuvent tourner sur leur tourillon. Des vis qu'on peut serrer à bloc rendent solidaires le cercle et l'axe de rotation. Ce dispositif a pour but l'élimination des erreurs accidentelles ou périodiques des traits.

La graduation des cercles varie suivant leurs dimensions. La division de 5′ en 5′ est fréquemment adoptée. Les degrés (fig. 74) sont seuls chiffrés, les 15′ se distinguent par des traits un peu plus longs que ceux des 5′, le trait de la division 30′ est intermédiaire

comme longueur entre les traits des degrés et des cinq minutes; au total, 4 320 traits. Le Cercle de l'Observatoire Lick[1], construit sur le modèle du Cercle de Strasbourg dont le professeur Winnecke a fourni les plans, est divisé de 2′ en 2′. Il en est de même du Cercle de Repsold à l'Observatoire d'Uccle[2] et de la plupart des cercles d'Allemagne. Les traits des degrés sont les plus grands; on a ensuite, par ordre de grandeur décroissante, les traits des demi-degrés, ceux des dizaines de minute et ceux des deux minutes; au total, 10 800 traits.

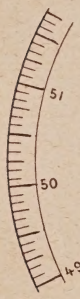


Fig. 74.

Le diamètre des cercles est essentiellement variable suivant les instruments : celui du Cercle de Gambey (Observatoire de Paris) est de 2 mètres, ceux du Cercle méridien du jardin et du Grand Instrument méridien au même Observatoire n'ont qu'un mètre; cette dernière dimension est celle que M. Boss[3] et M. Nyrén[4] préfèrent. En employant, comme le voudrait M. Gill[5], des cercles plus petits, on éviterait leur déformation sous l'influence des couches d'air de températures différentes

[1] Holden, **3**, *The sidereal Messenger,* vol. III, p. 301.
[2] Philippot, *Annuaire de l'Observatoire royal de Belgique pour 1907,* p. 293.
[3] Boss, **2**, *The astronomical Journal,* vol. XVI, p. 198.
[4] Nyren, *Astr. Nach.,* vol. CXIII, p. 241.
[5] Gill, *The Observatory,* vol. XVI, p. 190.

qui peut entraîner des variations d'une fraction sensible de seconde; mais il faudrait augmenter le pouvoir des microscopes de lecture et la finesse des divisions. D'un autre côté, M. Boss ne voit pas de raison pour que l'effet de la température soit angulairement plus sensible sur les grands cercles que sur les petits : ce sont des erreurs qu'on peut appeler semi-accidentelles. M. Newcomb n'est pas non plus partisan de la réduction du diamètre et base son opinion sur la comparaison des cercles de Washington et de Strasbourg. M. Nyrén critique le cercle méridien moderne de Repsold et préfère, au point de vue des erreurs de division, un cercle de 1 mètre de diamètre à un cercle de $0^{m},60$. Les cercles de l'Instrument méridien de Cincinnati n'ont que $0^{m},60$, et M. Porter[1] trouve que la précision des lectures est très grande. On voit, par ces exemples, que la question est loin d'être résolue.

Quant à la matière même des cercles, on a employé le cuivre, le laiton, la fonte et l'acier. MM. Newcomb et Copeland[2] pensent qu'on devrait expérimenter les cercles de verre.

La graduation des cercles est tracée sur une bande d'argent (Gambey employait le palladium) incrustée soit sur la couronne (instruments de Gambey), soit sur le plan du cercle (instruments modernes). Dans le premier cas, les traits sont parallèles à l'axe de rotation; dans le second, ils convergent vers le centre du cercle. Les chiffres sont gravés à l'envers, ils sont redressés quand on les regarde avec les microscopes de lecture. En 1890, M. Stéphan a fait remplacer la bande

[1] Porter, *The sidereal Messenger*, vol. VIII, p. 3.
[2] Copeland, *Monthly Notices*, vol. XLIV, p. 415.

d'argent du Cercle méridien de Marseille[1] par une bande en platine iridié au dixième; les surfaces conservent une grande netteté. La même transformation a été faite tout récemment au Cercle méridien du jardin de l'Observatoire de Paris.

Les cercles sont attachés à un disque faisant corps avec le tourillon par des rayons cylindriques ou en forme de parallélipipède rectangle. L'étude que M. Boss[2] a faite de la flexion des cercles l'a conduit à conclure que les rayons à section en T seraient préférables. Quant au mode de montage, il résulte d'expériences faites par M. P. Gautier[3], à la demande de Lœwy, que les rayons croisés assurent une répartition plus régulière de la pression sur la partie centrale. Ces expériences[4] ont montré aussi que les déformations irrégulières des cercles à jour subsistaient avec des cercles pleins, les causes d'erreur ayant été trouvées dans le mauvais agencement des microscopes de lecture. D'un autre côté, l'étude des erreurs de division du nouveau Cercle méridien de l'Observatoire du Cap[5] a mis en lumière l'excellence des cercles massifs de fonte.

Nous supposerons dans ce qui suit que les lectures à l'index croissent lorsque la lunette va du pôle à l'horizon Sud, de sorte que si elle était 0°, par exemple, au pôle, elle serait pour la latitude de Paris 41°10′ au zénith et 131°10′ à l'horizon Sud. Gambey graduait ses cercles

[1] Lœwy, *Rapport sur les observatoires astronomiques de province en 1890,* p. 31, *1891,* p. 34 *et 1892*, p. 32.

[2] Boss, **2**, *The astronomical Journal,* vol. XVI, p. 189.

[3] Gautier, **2**, *Bull. astr.,* t. XVIII, p. 217.

[4] Lœwy, **8**, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences,* Paris, t. CXL, p. 553.

[5] Gill, *Monthly Notices,* vol. LXIV, p. 303.

en sens inverse, de sorte que les lectures sous l'index allaient en augmentant quand la lunette tournait de l'horizon Sud vers l'équateur, le zénith et le pôle.

60. **Microscopes micrométriques.** — Le problème que nous avons à résoudre actuellement est le suivant : la lunette étant pointée sur un astre, c'est-à-dire l'objet bissecté par le fil horizontal fixe du réticule, déterminer au dixième de seconde la lecture à l'index. Il est de toute évidence que l'index seul ou même avec un vernier permettrait au plus l'appréciation du dixième de minute et ne donnerait pas la solution du problème avec la précision exigée. Aussi, dans tous les grands instruments modernes, on remplace l'index et le vernier par un système de microscopes micrométriques affectés à la subdivision des traits de la graduation, et dont nous allons examiner le mécanisme.

Les microscopes, au nombre de deux, quatre ou six, toujours en nombre pair, ont leurs axes placés perpendiculairement au plan du cercle gradué s'il est divisé sur le limbe (instruments modernes), sur le prolongement des rayons si la graduation est sur la couronne (instruments anciens, Gambey). Dans quelques cercles méridiens (Greenwich), la graduation forme une surface conique; les axes doivent alors être perpendiculaires au plan tangent au cône, au point où l'axe du microscope rencontre cette surface. Quel que soit le nombre des microscopes, on les groupe par deux aux extrémités d'un même diamètre; chaque groupe forme un couple. On verra plus loin l'importance capitale de cette dispostion. Lorsqu'il y a six microscopes, on les place à 60° les uns des autres, dont un couple sur un diamètre

horizontal; s'il n'y en a que quatre, ils sont situés aux extrémités de deux diamètres perpendiculaires, l'un horizontal, l'autre vertical. Lorsqu'on ne fait usage que de deux microscopes, ceux-ci sont évidemment à 180°. En règle générale, les microscopes sont équidistants (60°, 90° ou 180°); mais la disposition qui consiste à en placer deux sur un diamètre horizontal n'est pas absolue. A l'Observatoire d'Uccle (4 microscopes), les diamètres de chaque couple sont inclinés à 45° sur l'horizontale, de sorte que les deux microscopes supérieurs sont sur la même horizontale, et de même pour les deux microscopes inférieurs. Il est bon de remarquer que la disposition des microscopes les met en rapport intime avec la température des couches d'air. Il est d'usage de numéroter les microscopes et d'en faire la lecture toujours dans le même ordre. Par exemple, dans le cas de six microscopes, on lira les trois microscopes Nord en montant et les trois microscopes Sud en descendant. Cette remarque n'est pas sans importance, car on doit pouvoir toujours se rendre compte, dans la discussion des observations, des microscopes employés. Voici les conventions adoptées à l'Observatoire de Paris (fig. 75) : au Grand Instrument méridien, couple *a* (3, 4), couple *b* (1, 6), couple *c* (2, 5), ordre de lecture 6, 4, 2, 1, 3, 5; au Cercle de Gambey, couple *a* (1, 2), couple *b* (3, 4), couple *c* (5, 6), ordre de lecture 1, 6, 4, 2, 5, 3. Nous répétons que ce sont là de simples conventions n'ayant d'autre but que de mettre de l'ordre dans de grands amas de chiffres. A Greenwich (fig. 75), le système de lecture du cercle comprend dix microscopes. D'abord les six microscopes A, B, C, D, E, F, disposés comme

ceux du Grand Instrument méridien ; puis deux microscopes a, et b, à 20° de A et de B, et deux microscopes α et β, à 25° de A et de B ; l'index est en P. Les microscopes a, b, α, β servent pour l'étude des erreurs de la graduation ; ils suppléent les six premiers en cas de nécessité. On lit les six premiers dans l'ordre A, C, E, B, D, F.

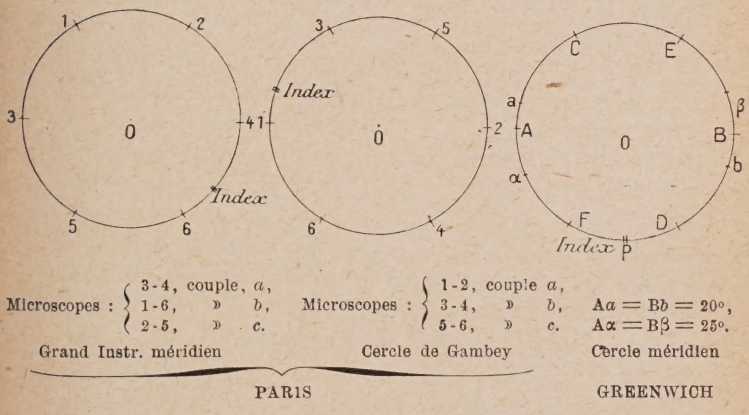


Fig. 75.

Chaque microscope donne l'image d'un certain nombre de traits de la division suivant la grandeur du champ. Il se compose d'un tube principal dans lequel peuvent glisser le tube objectif et le tube porte-oculaire. Le premier (objectif), placé en regard de la graduation, peut être fixé invariablement au tube principal à l'aide de vis de pression ou d'un collier de serrage, lorsque la mise des images à la distance voulue est faite. Le second (oculaire) est monté à frottement sur

le tube principal, de manière à permettre une rapide mise au point. Dans le plan de l'image des traits, on place un châssis ou cadre métallique sur lequel sont tendus deux fils parallèles (procédé d'Encke[1]) de cocon d'araignée, et orientés parallèlement aux traits du cercle situés en face du microscope considéré.

On obtient cette orientation en tournant le microscope dans son support. Un seul fil ne saurait convenir, son épaisseur étant beaucoup plus petite que celle des traits de la graduation, si bien gravés soient-ils. Le fil devenant invisible sous toute la largeur du trait, on commettrait des erreurs de pointé considérables. Dans quelques instruments, au lieu de deux fils parallèles (1°, fig. 76), on a une croisée de fils que l'on fait coïncider (2°, fig. 76) avec le trait. Pond[2] employait ce dernier dispositif pour la lecture des microscopes du Cercle de Greenwich. Dans le premier procédé, la distance des fils est un peu plus grande que l'épaisseur des traits. On doit faire en sorte, lorsque l'éclairage est bien réglé, que dans les pointés les deux bandes lumineuses situées de part et d'autre du trait soient aussi égales que possible. Le châssis porte un écrou A (fig. 77) qu'une vis V peut entraîner. Cette vis est à très petit pas et travaillée avec le plus grand soin; la tige est

Fig. 76.

[1] Encke, *Astronomische Beobachtungen auf der Königl. Sternwarte zu Berlin*, vol. IX, p. IX.

[2] Pond, *Astronomical Observations made at the royal Observatory at Greenwich in the year 1832*, pl. II.

mobile dans une bague et, en tournant dans cette bague, la vis déplacera les fils perpendiculairement à son axe. Les axes des vis sont, bien entendu, dans le plan des rayons du cercle ou dans un plan parallèle, suivant la graduation adoptée.

Le déplacement de la vis se mesure à l'aide d'un tambour divisé en 60 parties égales en regard desquelles on a fixé un index. Un tour complet de la vis amène sous l'index la même division. On a donc la possibilité d'évaluer un espace égal au soixantième du pas de la vis, espace qu'on peut subdiviser en dix par l'appréciation du dixième de partie. Les graduations du tambour et de l'index, comme celles des vis du micromètre, sont sur argent ou mieux sur celluloïd.

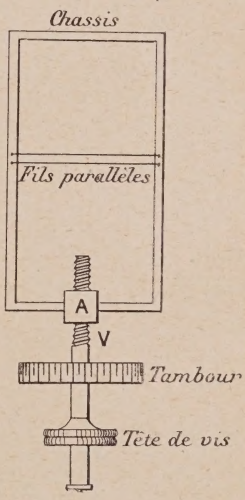


Fig. 77.

On dispose le microscope de façon que cinq (ou deux) tours entiers de la vis correspondent à la distance de deux traits consécutifs. En déplaçant l'objectif du microscope, on fait varier la distance des images de ces deux traits et on peut la rendre, à très peu près, égale à la distance des deux positions des fils correspondant à cinq (ou deux) tours entiers de la vis. Si l'on désigne par o la longueur de l'objet (distance de deux traits consécutifs) et par i la longueur correspondante de l'image, par p et p' les distances du centre optique à

l'objet et à l'image, par f la distance focale principale, on a les deux relations :

$$\frac{i}{o} = \frac{p'}{p}, \qquad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f},$$

qui feront connaître p et p', en fonction de i, o et f. En réalité, on procède par essais et non par calcul. Dans ce réglage, si l'image n'est plus dans le plan du cadre qui porte les fils, il faudra déplacer le tube principal.

Oudemans[1] a imaginé un procédé très simple pour effectuer cette rectification des images des traits. Krueger[2], de son côté, a inventé un petit appareil qui facilite la rectification de la position des microscopes et qui permet de rendre l'erreur du tour aussi petite que possible.

On aurait pu, comme pour le micromètre d'ascension droite, adjoindre un second tambour donnant par un système de roues dentées (compteur de tours) le nombre de tours effectués par le premier tambour en relation avec le châssis. On préfère, en général, le dispositif suivant. En regard du châssis (fig. 78) et dans un plan parallèle, on a disposé une plaque métallique MM dont le bord, côté du centre, est taillé en peigne présentant des dents d'égales dimensions (entailles et saillies analogues à celles d'une scie). La distance de deux pointes corres-

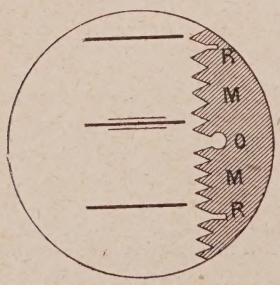


Fig. 78.

[1] Oudemans, **2**, *Astr. Nach.*, vol. LXXX, col. 239.
[2] Krueger, **1**, *Astr. Nach.*, vol. CIX, col. 201.

pond à un tour de la vis du tambour. Le milieu du peigne, situé sur le diamètre horizontal qui passe par le centre du champ, est indiqué par une encoche circulaire O, les dents situées à cinq tours par des encoches rectangulaires R, R. Imaginons un fil idéal passant par le centre de l'encoche circulaire, pointons ce fil avec le couple de fils parallèles et réglons le tambour de façon qu'il marque alors zéro à son index. Ce fil idéal sera le trait-repère auquel nous rapporterons les distances des traits de la graduation. En réalité, il n'est pas nécessaire que le fil idéal passe rigoureusement par le centre du cercle O : la position de l'index est, en effet, absolument arbitraire ; il suffit que le trait-repère qu'on vient de définir soit assez voisin du centre de O pour qu'on ne fasse pas d'erreur dans le décompte des tours de la vis.

Nous avons dit qu'au lieu d'un microscope on emploie, pour augmenter le degré de précision des lectures, deux, quatre ou six microscopes. Ces microscopes sont réglés de telle sorte que les traits-repères fictifs (centres des trous O) soient à 60° les uns des autres, à quelques secondes près au maximum. Lorsqu'on lira les six microscopes, par exemple, on aura pour chaque tambour le même nombre de tours (c'est-à-dire d'encoches). On évalue le nombre de parties et les fractions de partie (au dixième) pour chaque microscope et l'on prend la moyenne des déterminations.

Toutes les lectures se faisant dans les mêmes conditions, on conçoit qu'il est permis de procéder ainsi. Imaginons, en effet, qu'après avoir placé un seul microscope comme index, on en place un second situé à n degrés du premier. Si l'on a effectué une lecture l au

premier microscope, au second on lira $l+n$, et la moyenne sera :

$$l+\frac{n}{2};$$

la lecture est augmentée de $\frac{n}{2}$. Une autre lecture l' au premier microscope, pour une autre position du cercle, augmenterait aussi de $\frac{n}{2}$ si on l'effectuait avec les deux microscopes et deviendrait :

$$l'+\frac{n}{2}.$$

La différence des deux lectures dans le second cas est $l'-l$ comme dans le premier, aux erreurs accidentelles près ; mais comme dans le second cas les résultats sont basés sur deux lectures, la précision peut être considérée comme plus grande, et elle ira en augmentant avec le nombre des microscopes adjoints au premier.

Dans les cercles ayant six microscopes, il n'est pas toujours utile de les lire tous les six. Dans certaines déterminations, il suffira d'en lire deux, mais il est important de toujours lire un couple de microscopes à 180° pour éliminer, ainsi qu'on le verra plus loin, les erreurs provenant de ce que le centre du cercle gradué peut ne pas être rigoureusement sur l'axe du tourillon.

L'erreur probable d'une lecture faite à $2m$ microscopes est égale à l'erreur probable ε d'une lecture à un microscope divisée par $\sqrt{2m}$. Si ε est égal à $0''{,}5$ et que la lecture soit faite à 6 microscopes, l'erreur probable de la moyenne sera :

$$\frac{0''{,}5}{\sqrt{6}}=0''{,}2.$$

Pour une raison analogue à celle que nous avons donnée au sujet de l'accroissement du nombre des fils horaires, on ne dépasse jamais le nombre de six microscopes. Quelques observateurs lisent deux fois chaque microscope et écrivent pour chacun d'eux la demi-somme des deux lectures. Un observateur exercé peut s'éviter le surcroît de fatigue qui résulte de cette manière de procéder.

Les pointés doivent se faire dans chaque microscope entre deux fils *ff* (1°, fig. 79) parallèles à l'axe de la

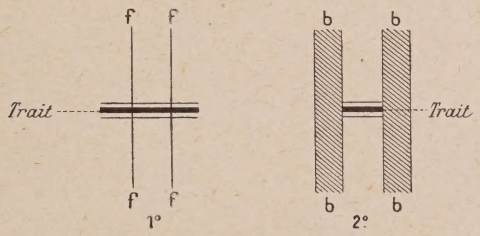


Fig. 79.

vis et dont les distances au centre du cercle sont les mêmes dans les six microscopes. Au lieu de fils, on a employé avec succès, au Cercle méridien du jardin de l'Observatoire de Paris[1], des bandes circulaires *b*, *b*, dans un plan aussi voisin que possible de celui des fils mobiles (2°, fig. 79), qui ne permettent de faire le pointé que dans la région médiane du fil. On évite ainsi les erreurs qui proviendraient de l'inclinaison relative des deux fils sur le trait pointé, et surtout des

[1] Baillaud, *Rapport annuel sur l'état de l'Observatoire de Paris pour l'année 1907*, p. 12.

différences d'apparence que peut présenter le trait dans sa longueur. Pour éviter les erreurs de parallaxe, il faut amener les fils parallèles sur le trait le plus rapproché du milieu du peigne. La lecture sera additive ou soustractive : nous indiquerons plus loin la manière dont on procède.

L'éclairage des traits en regard des microscopes se fait au moyen d'une source lumineuse placée assez loin du cercle sur le prolongement de l'axe de rotation ; un système de réflecteurs renvoie la lumière au point voulu. A l'Observatoire de Cincinnati[1], de petites lampes électriques placées au bout de chaque microscope sont allumées tour à tour. Ce procédé d'éclairage vient d'être expérimenté au Cercle méridien du jardin de l'Observatoire de Paris.

Nous signalerons encore un mode d'éclairage proposé par M. Becker[2], et dans lequel il met à profit la réflexion interne dans des baguettes de verre qui amènent la lumière comme le ferait un tube creux pour un liquide. Le réglage de l'éclairement des traits joue un rôle capital dans la précision des lectures. On doit faire en sorte que chaque trait de la graduation soit net, sans franges plus brillantes d'un côté que de l'autre. Il est souvent difficile de faire disparaître complètement les raies lumineuses qui bordent dans quelques cas le trait noir d'une division. D'après M. Bruck[3], ces reflets ne semblent pas exercer d'influence fâcheuse sur les pointés. Ce qu'il est essentiel d'avoir, c'est un trait noir non estompé sur les bords. Dans le procédé

[1] Porter, *The sidereal Messenger,* vol. VIII, p. 3.
[2] Becker, **2**, *The Observatory*, vol. XXIV, p. 394.
[3] Bruck, **3**, *Bull. astr.*, t. XXIII, p. 91.

d'Encke, la bissection est estimée, mais elle se fait cependant avec une grande précision, surtout lorsque l'écart des fils n'est pas trop considérable. Cette estime se fait d'ailleurs d'une façon uniforme pour chaque observateur et ne saurait avoir d'influence sur les résultats. Bessel était partisan de cette méthode de pointage des traits.

Les peignes ne sont pas rigoureusement fixés dans la boîte qui porte les fils mobiles et l'oculaire du microscope. Ils sont maintenus par des vis. En desserrant celles-ci, on peut déplacer les peignes dans le sens de l'axe de la vis. Pour régler les peignes, on place des repères sur le cercle à 60° exactement les uns des autres. Ces repères sont de simples bandes de papier blanc taillées en pointe et qu'on fixe sur le cercle avec un peu de cire molle ou simplement de vaseline. On amène la division située en face d'un repère au milieu du premier microscope en regard du trou circulaire, puis on déplace les peignes des autres microscopes de façon à les mettre en regard des traits situés en face des repères. Les tambours des microscopes sont le plus souvent à frottement dur sur l'axe-prolongement de la vis. Il suffit pour les régler de mettre le zéro en regard de l'index quand les traits sont au milieu du repère circulaire du peigne. Il n'y a lieu de procéder au réglage que de loin en loin. Dans le réglage on devra faire en sorte que la lecture à l'origine adoptée (pôle ou zénith, par exemple) soit aussi faible que possible. Lorsque dans le réglage les trous circulaires des peignes ne sont plus dans le voisinage du centre du champ, on doit agir sur la monture du microscope. Il est bien évident qu'un léger déréglage des tambours n'a d'autre

inconvénient que de rendre le calcul des moyennes moins rapide; mais il est de toute importance, nous le répétons, que les microscopes restent diamétralement opposés deux à deux, au moins très approximativement.

La petitesse du champ des microscopes ne permet pas de lire la graduation. Pour obvier à cet inconvénient, on ajoute, dans les grands instruments méridiens, un microscope-index spécial qui donne le nombre de degrés et de cinq (ou deux) minutes. Le repère de ce microscope est un simple fil dirigé suivant un rayon. La moyenne des autres microscopes donne le complément de la lecture : les minutes par les entailles des peignes, les secondes par les divisions du tambour, les dixièmes de seconde à l'estime. Dans les anciens instruments, cet index n'était qu'une simple pointe métallique placée en regard de la graduation; on faisait la lecture soit à l'œil nu, soit avec une loupe. La position de l'index est très variable, ainsi qu'on le voit par la figure 75. Le champ du microscope-index doit être d'un degré et demi, de sorte qu'on ait toujours dans le champ un degré chiffré; celui des microscopes de lecture est de 15′ dans les cercles gradués de 5′ en 5′.

61. **Lecture des microscopes.** — Nous supposerons que les lectures du cercle sous l'index croissent avec les distances polaires. Soit *ab* (1°, fig. 80) le trait le plus rapproché de O. On a lu, par exemple, 93°30′ au microscope-index. Pour aller du repère O à *ab*, nous comptons une entaille, soit 1 tour ou 1′; si la lecture du tambour est 43″,6, la lecture complète du microscope sera :

$$93°30' + 1' \,.\, 43'',6 = 93° \,.\, 31' \,.\, 43'',6,$$

en admettant que le tour de la vis vaille exactement 1′ d'arc. La lecture ainsi effectuée est dite par *tours positifs*.

Soit maintenant *ab* (2°, fig. 80) le trait le plus rapproché de O. On a lu, par exemple, 113°5′ au microscope-index. Le pointé dans le cas actuel est fait en *ab;* il aurait fallu le faire en *a′b′* et l'on aurait eu pour la lecture complète :

113°5′ + distance de O à *a′b′*,

ce qui équivaut à

113°10′ — distance de O à *ab*,

la distance de deux traits étant de cinq minutes. Mais au lieu de retrancher de la lecture au trait 113°10′ la distance de O à *ab*, c'est-à-dire dans le cas actuel 1′ et une fraction, on préfère retrancher deux parties et ajouter le complément de la fraction à 60, distance comptée positivement de l'entaille — 2 à *ab*. En somme, une lecture en tours négatifs doit être regardée comme un binôme, de la forme $-a+b$, ajouté à la lecture à l'index. Dans ce binôme, $-a$ représente le nombre de tours correspondant à l'entaille située au delà du trait et $+b$ la fraction en soixantièmes du tour et parties décimales, fraction lue directement sur le tambour

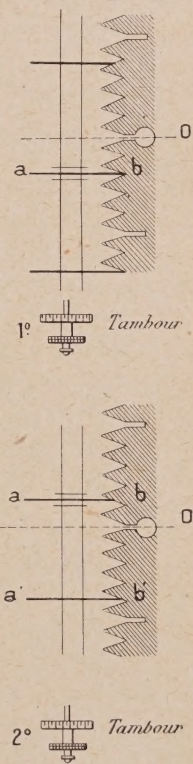


Fig. 80.

comme dans le cas précédent. On voit l'analogie avec le procédé de calcul employé pour rendre seule négative la caractéristique du logarithme d'un nombre plus petit que l'unité. Si, dans le cas actuel, la lecture au tambour est $47^p,2$, on aura pour la lecture complète :

$$113^\circ . 10' - 2' + 47^p,2 = 113^\circ . 8' . 47'',2,$$

en admettant que le tour de la vis vaille exactement $1'$ d'arc. La lecture ainsi effectuée est dite par *tours négatifs*. Comme il est nécessaire de savoir quel est le trait du cercle auquel on rapporte la lecture, on indique par le signe — au-dessus du chiffre des minutes les lectures par tours négatifs. Ainsi le nombre ci-dessus s'écrira :

$$113^\circ . \overline{8}' . 47'',2,$$

la lecture étant rapportée au trait $113^\circ . 10'$ (-2), et non au trait $113^\circ . 5'$ $(+3)$.

Les lectures effectuées aux microscopes micrométriques peuvent être affectées d'erreurs systématiques. Il résulte des expériences que Lœwy[1] a fait exécuter à l'Instrument méridien du jardin, à l'Observatoire de Paris, en 1904, que l'examen des objectifs des microscopes devrait être fait avec le plus grand soin. Les images d'un même trait doivent offrir le même aspect en passant successivement sous tous les microscopes. Le centrage de la source lumineuse joue aussi un rôle important. Enfin il ne faut pas que les objectifs soient trop petits ni leur distance focale trop courte.

Le mode de monture des microscopes joue évidemment aussi un rôle dans la précision des lectures.

[1] Lœwy, **8**, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. CXL, p. 553.

Jusqu'à présent les constructeurs ne sont pas arrivés à un modèle-type réunissant tous les suffrages. On a essayé de les fixer dans la pierre, dans le marbre (Cercle méridien du jardin, Paris). Ceux du Grand Instrument méridien (Paris) sont assujettis sur des supports solides, en fonte, scellés dans la pierre. A Strasbourg, les supports sont entièrement métalliques. Dans le Cercle méridien double de l'Observatoire de Besançon (P. Gautier, 1886), à chaque cercle divisé correspond un cercle porteur très massif, sur lequel sont fixés les six microscopes au moyen de fortes vis de serrage. Ce mode de support a été adopté à Paris pour les deux cercles de l'Instrument du jardin. Dans le mode de monture métallique, l'équilibre de température doit s'établir avec plus de rapidité et de régularité, ce qui doit le faire préférer au scellement dans la pierre, dont les dilatations sont très irrégulières.

Il y aurait enfin lieu de tenir compte de l'effet de l'usure des vis micrométriques. L'importance des erreurs des vis a été signalée par M. Christie[1]. M. Gill[2] a fait un examen des erreurs systématiques des lectures des microscopes au Cercle méridien du Cap, et comme conclusion voudrait qu'on tînt compte des erreurs des vis.

Dans le Cercle méridien double de Besançon (le premier de ce genre) et dans celui du jardin (Observatoire de Paris), la lecture croît pour l'un des systèmes de microscopes et décroît pour l'autre de la même quantité, lorsqu'on fait tourner la lunette. Gruey[3] aurait

[1] Christie, **1**, *Memoirs of the royal astronomical Society*, vol. XLV, p. 151.

[2] Gill, **2**, *The Observatory*, vol. VIII, p. 176.

[3] Gruey, **1**, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. CI, p. 1236.

préféré que les cercles eussent été divisés en sens contraire, les divisions de même numéro demeurant affectées de la même erreur systématique, ce qui serait facile à réaliser par le constructeur. C'est un détail qu'il est bon de signaler à l'attention des astronomes.

CHAPITRE II

LES ACCESSOIRES

62. **Horizons artificiels.** — Nous avons montré dans l'introduction de cet ouvrage qu'il existe en un lieu deux directions primordiales qu'on peut déterminer par l'observation : l'axe du monde et la verticale. La lunette étant orientée dans le plan méridien déterminé par ces deux droites, les observations peuvent être rapportées soit au pôle (axe du monde), soit au zénith ou au nadir (verticale). Nous nous occuperons dans ce chapitre de la description des appareils qui permettent de déterminer la position du cercle correspondant à la position verticale de l'axe de la lunette, l'objectif dirigé vers le bas (observation du nadir) ou dirigé vers le haut (observation du zénith). Nous avons déjà parlé de cette dernière détermination à propos du collimateur zénithal. L'observation du nadir, comme celle du zénith, exige l'emploi d'un horizon artificiel, c'est-à-dire d'une surface horizontale réfléchissante. Le procédé d'observation consiste à placer la lunette de façon que le fil de déclinaison soit en coïncidence avec son image. Nous donnerons plus loin les détails de

l'opération. La détermination du nadir joue un rôle capital dans la mesure des distances polaires absolues, mais elle présente de grandes difficultés qui sont loin d'avoir été toutes aplanies.

La principale réside dans les mouvements incessants de la surface du sol, oscillations mises en évidence par des faits nombreux : observations des niveaux, des mires et surtout des sismographes. Il y a d'ailleurs, ainsi que l'a dit très justement de Rebeur-Paschwitz[1], des raisons théoriques pour qu'il en soit ainsi, l'écorce terrestre étant douée d'élasticité et soumise à des pressions essentiellement variables.

Si l'observation du nadir est de premier ordre, la comparaison de l'observation directe des étoiles à leur observation par réflexion sur l'horizon artificiel joue aussi un rôle très important dans la pratique des observations méridiennes. On comprend alors tout l'intérêt qui s'attache à la solution de ce problème : obtenir une surface plane, horizontale, réfléchissante, absolument nette et calme, c'est-à-dire à l'abri des trépidations du sol et des mouvements de l'air. De nombreux observateurs ont, depuis plus d'un siècle, tenté de résoudre cette question. Tous ou presque tous ont adopté en principe la cuvette à mercure. Les dispositifs employés reviennent soit à agir sur le liquide pour le rendre moins mobile (forme de la cuvette, addition d'alliage, diminution de l'épaisseur de la couche liquide, manchons mettant à l'abri du vent, etc.), soit à varier les moyens de suspension ou d'appui (ressorts, coussinets, matelas, etc.). Nous ne pouvons donner ici toutes les

[1] Rebeur-Paschwitz, **1**, *Astr. Nach.*, vol. CXX, col. 273.

dispositions adoptées, nous croyons utile cependant d'en passer en revue un certain nombre, afin qu'on puisse bien se rendre compte des tentatives faites pour solutionner cette question. Nous mettrons en évidence, par cette énumération, les difficultés que présente la solution du problème.

63. **Bain de mercure.** — Examinons d'abord l'influence des cuvettes employées. Le procédé primitif pour avoir une surface horizontale réfléchissante consiste à verser dans un vase d'assez grande ouverture une couche plus ou moins épaisse de mercure bien propre. Pour réaliser cette dernière condition, on fait écouler le liquide de son récipient par un orifice inférieur, ou on le filtre à travers une peau de chamois. Les astronomes durent reconnaître qu'un bain ainsi préparé ne leur donnait que rarement de belles images des fils du micromètre; or c'est sur la qualité de ces images que repose la bonne observation du nadir. Les ondes quelquefois visibles à l'œil nu, mais le plus souvent mises en évidence par le trouble des images, amenèrent les physiciens à en étudier la formation et les effets. Hossard[1] établit que deux causes contribuent à agiter et à déformer les images : 1° un balancement général du bain donnant lieu à des oscillations régulières des images; ces oscillations, produites par une cause passagère, n'ont pas de durée. Elles gênent peu l'observation lorsqu'elles sont faibles, il suffit de faire en sorte que le fil vu directement partage en deux l'intervalle des positions extrêmes des images; peut-être même la

[1] Hossard, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. XXXIX, p. 656.

grande mobilité du mercure assure-t-elle l'exactitude des résultats moyens, en amoindrissant les chances d'erreurs systématiques; 2° des vibrations des parois du vase produisant une série d'ondes à la surface du liquide. Dans le cas d'une capsule circulaire, elles se propagent en cercles concentriques convergeant vers le centre du bain, d'où elles sont renvoyées vers les bords, et ainsi de suite. Elles donnent lieu à des déformations et à des déplacements irréguliers de l'image, au point de la détruire parfois complètement. Dans les grandes villes, elles rendent les observations impossibles pendant tout le temps de la circulation des voitures. Le milieu de la cuvette vers lequel on dirige l'axe optique est précisément le point de concentration des ondes, et où doit, par conséquent, régner le plus grand désordre. Si l'axe optique était dirigé entre le centre et le bord et que l'image d'un des fils prolongés passât par le centre du bain, le fil perpendiculaire se projetant sur l'une des cordes de la circonférence qui limite le liquide, le fil dirigé vers le centre ne devrait éprouver aucune oscillation latérale, mais seulement des déplacements longitudinaux, tandis que les fils qui coupent les ondes, ou leur sont tangents, pourraient être fortement agités dans le sens transversal. On vérifie assez facilement le déplacement longitudinal du fil dirigé vers le centre par l'observation des défectuosités de ce fil. Avec une capsule rectangulaire, l'observation a prouvé que les ondes sont rectilignes dans deux sens perpendiculaires, parallèles aux bords de la capsule; l'agitation a lieu dans tous les sens, et le centre n'est pas plus agité que la partie moyenne.

Cette question des ondulations qui se forment dans

une nappe liquide reposant sur une plaque vibrante a été l'objet des recherches d'un grand nombre de physiciens. Nous citerons entre autres les travaux de Faye[1] sur l'influence d'un choc produit sur le sol où repose le bain liquide, et qui le conduisent à conclure qu'il serait possible de fixer la position des points où les vibrations atteignent leur maximum d'intensité.

Les expériences faites par le colonel Hossard, ainsi que celles effectuées à l'Observatoire de Paris, ont conduit Y. Villarceau[2] à conclure que les conditions les plus favorables à l'établissement d'un bain de mercure sont : 1° employer un vase de forme circulaire et le disposer de manière à n'admettre dans la lunette que des rayons réfléchis dans le voisinage des bords du vase; 2° lui donner de grandes dimensions. Pour obtenir une surface liquide exempte de toutes les impuretés qui ne tardent pas à troubler rapidement sa limpidité, Villarceau emploie l'appareil connu sous la dénomination d'encrier siphoïde, et modifié en y remplaçant l'étroite ouverture où l'on plonge la plume par une cuvette large (46 centimètres) et peu profonde (1 centimètre).

La cuvette est pourvue d'une rigole légèrement inclinée d'un côté et aboutissant à un robinet. Le côté opposé de la cuvette est en communication, au moyen d'un tuyau, avec le fond du réservoir. Il suffit de quelques tours de vis du piston, dans le réservoir à mercure, pour remplir ou vider la cuvette, et, comme

[1] Faye, 3, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. LVIII, p. 565.

[2] Yvon Villarceau, 2, *Annales de l'Observatoire de Paris* (Observations), t. XII, p. 60.

le liquide arrive à celle-ci en passant par le fond du réservoir, aucune des impuretés qui flottent à la surface du mercure ne parvient à la cuvette, et le métal forme toujours une nappe de la plus parfaite limpidité. Quand, au contraire, on fait rentrer le mercure dans le réservoir, les poussières qui s'étaient déposées sur la surface du liquide sont entraînées avec le mercure dans le réservoir où elles remontent à la surface; elles ne peuvent plus sortir du récipient, à moins qu'on ne le vide au moyen d'un robinet spécial. Les observations nadirales faites avec cette cuvette par Faye et Y. Villarceau leur ont montré que l'agitation de l'air faisait, autant que les trépidations du sol, obstacle à la détermination du nadir. Lorsqu'on fait usage d'une cuvette de grand diamètre et à fond plan; on doit préalablement s'assurer, au moins d'une façon approchée, de l'horizontalité du fond. L'emploi du niveau à bulle d'air monté sur une plaque métallique à faces planes parallèles à l'axe de la fiole est tout indiqué. Des vis calantes adaptées soit au plateau, soit au chariot qui le porte, permettent d'effectuer cette rectification de l'inclinaison du fond de la cuvette.

M. C. Le Paige[1] a fait il y a quelques années, à Liège, une étude suivie de cette question en employant le procédé primitif, quelque peu modifié. Il a d'abord fait usage d'une cuvette carrée en bois de 40 centimètres de côté, placée horizontalement au moyen de vis calantes. Le fond est strié, et les stries, de 1 millimètre environ de profondeur, sont espacées de 2 mil-

[1] Le Paige, *Mémoires de la Société royale des Sciences de Liège*, t. III, 3e série.

limètres, d'après une remarque faite par Le Verrier[1]. La cuvette est remplie de mercure sous une épaisseur de 6 millimètres, de façon que le liquide touche les bords; puis on en soutire une partie, en réduisant la hauteur du mercure à 3 et même à 2 millimètres, sans que la couche cesse de toucher les bords. On obtient ainsi des images plus stables, mais ayant moins d'éclat. Une seconde cuvette, en bois également, était circulaire et striée circulairement, lestée par des feuilles de plomb et munie de vis calantes. Son diamètre était de 20 centimètres. A Cointe (Liège), où M. Le Paige a fait ses expériences, les bains reposent directement sur le plancher de la salle; l'observateur en est éloigné, grâce à la construction de la tribune d'observation qui est suspendue à la charpente de la salle, de manière à éviter tout contact avec le sol. Les conclusions auxquelles est arrivé M. Le Paige sont très intéressantes. Il constate d'abord qu'une mise au point imparfaite produit des vibrations apparentes de l'image, en tout semblables aux *tremors* de la surface. C'est bien en réalité au défaut de mise au point qu'est due cette apparence, le phénomène se reproduisant lorsqu'on visait avec la lunette un objet distant de 3 kilomètres : le plus faible déplacement de l'oculaire mettait l'image en état de vibration. L'image reprenait sa netteté quand la mise au point était de nouveau réalisée. Le premier bain (cuvette carrée) fournit les images les plus nettes : il se produit parfois de très légères oscillations pendulaires, perpendiculaires aux stries. En tournant le bain de 90°, les oscillations se déplacent

[1] Le Verrier, 1, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), T. LXVIII, p. 157.

de 90°. Le second bain confirme ce fait par la production d'ondes centripètes. Les oscillations pendulaires, transportant toute l'image du réticule, ne détruisent pas la netteté des images : elles rendent les pointés moins précis sans les rendre impossibles. A côté des oscillations se produisent les trépidations. Celles-ci, lorsqu'elles sont faibles, affaiblissent l'image en l'élargissant. Dans certaines limites, elles permettent encore les pointés. Les trépidations produites par le passage des voitures s'arrêtent très rapidement. Elles commencent à se produire lorsque la voiture se trouve à une quinzaine de mètres et atteignent leur maximum lorsqu'elle est dans l'axe Est-Ouest de la salle. Au moment du maximum, l'image disparaît presque entièrement. Le passage des trains du chemin de fer à 700 mètres ne produit aucune variation sensible. La seule cause qui rende les observations vraiment difficiles est le vent lorsqu'il est fort. En résumé, les observations au bain de mercure en couche épaisse (2 à 3 millimètres) semblent possibles dans les conditions ordinaires : cuvette sur le plancher, observateur isolé. M. Le Paige conclut, avec raison d'ailleurs, que les résultats obtenus dépendent peut-être de la situation de l'Observatoire de Liège, bien qu'il se soit efforcé d'opérer dans des conditions éminemment défavorables aux observations par réflexion.

A Strasbourg et à Leyde, le bain consiste en un plateau de cuivre, légèrement creusé suivant la forme sphérique et placé très près de l'objectif, dispositif approuvé par M. Newcomb[1]. Pour supprimer, ou tout

[1] Newcomb, **1**, *Report to the secretary of the navy*, 1884, p. 20.

au moins pour amortir rapidement les ondulations et les trépidations de la couche liquide, on a expérimenté des cuvettes amalgamées. On peut aussi régler la mobilité du liquide soit en diminuant l'épaisseur de la couche, soit en ajoutant un peu d'amalgame. Les premiers essais faits par Pritchard[1] consistaient à placer une bande de cuivre amalgamé tout autour du réservoir à mercure et à dépolir le fond de la cuvette. Il pouvait ainsi réduire sensiblement la quantité de mercure, mais c'était insuffisant pour éteindre les vibrations. Il pensa alors à amalgamer le fond du réservoir ainsi que les côtés, ce qui lui permit de réduire la quantité de mercure au douzième et même au quinzième de ce qu'il fallait primitivement pour recouvrir le fond de la cuvette. La surface du mercure était absolument calme, l'image des fils nette et immobile, même avec les fenêtres ouvertes et par un vent assez fort pour éteindre les becs de gaz; mais la surface réfléchissante était loin d'être brillante et propre. Après de nombreux essais d'amalgamation à l'acide ou sans acide, d'argenture par la galvanoplastie ou par des procédés chimiques, Pritchard emploie sans succès les cuvettes d'étain et de platine. Il construit alors une cuvette rectangulaire de cuivre dont le rebord n'a que $\frac{1}{20}$ à $\frac{1}{30}$ de pouce de hauteur; cette cuvette est élargie et surélevée par un rebord de fer ou de bois. Le fond et les rebords de la cuvette proprement dite sont amalgamés par friction avec du mercure et du tripoli. Le nettoyage du liquide se fait mécaniquement en le râclant rapidement

[1] Pritchard, *Monthly Notices*, vol. XIII, p. 61.

avec une pièce rectangulaire s'ajustant sur la section de la cuve perpendiculaire à la grande direction.

Œrtling[1], de son côté, emploie une cuvette de cuivre dont la profondeur n'excède pas $\frac{1}{120}$ de pouce, amalgamée à l'aide de l'acide chlorhydrique. Le mercure est essuyé avec soin et donne une surface brillante et calme, qui cependant ne résiste pas à l'action du vent.

De Boë[2], plus récemment, fait usage d'une cuvette à fond plat sur lequel il place une plaque daguerrienne. Après avoir frotté cette plaque avec le doigt et un peu de mercure, il y laisse tomber quelques gouttes de ce métal. Le fond du liquide devient plus adhérent, ce qui produit une extinction presque complète des vibrations.

A l'Observatoire Dudley[3], on a obtenu de bons résultats avec une cuvette de fonte amalgamée à l'aide de l'acide nitrique. Depuis 1890, on fait usage à Greenwich d'une cuvette dont le fond est en cuivre amalgamé.

M. Le Paige a aussi fait l'essai d'une cuvette consistant en un plateau circulaire de cuivre rouge de 35 centimètres de diamètre. Au moyen d'un léger martelage, la feuille de cuivre a reçu une faible courbure. Après l'avoir amalgamée, on l'a placée sur une cuvette en bois portée par des vis calantes. Les résultats obtenus ont été aussi satisfaisants qu'avec la cuvette carrée décrite plus haut.

[1] Œrtling, *Poggendorf's Annalen*, vol. LXXIX, p. 136.
[2] De Boë, *Monthly Notices*, vol. XXXVII, p. 409.
[3] Copeland, 2, *Copernicus*, t. III, p. 133.

64. **Divers modes de suspension des cuvettes.** — Il était naturel de chercher à amortir les vibrations soit en posant la cuvette sur des coussins spéciaux, soit en la suspendant, soit en la faisant flotter. Parmi les premières expériences, on doit citer celles de Mauvais[1], faites dans les papeteries de Séguin, où cet habile observateur employa comme amortisseur des plaques de caoutchouc, des ballons en caoutchouc ou en parchemin mouillé, des ressorts de sommier, des ressorts en hélice. Aucun de ces procédés ne parvint à éteindre les vibrations qui restaient visibles à l'œil. Des lanières en caoutchouc vulcanisé donnèrent de meilleurs résultats. L'élasticité par traction semble préférable à tout autre mode d'amortissement; la cuvette doit être aussi légère que possible.

Gambey[1] avait adapté au pilier du Cercle mural (Observatoire de Paris) un système de potences articulées qui avaient pour objet de supporter une longue tablette sur laquelle on plaçait une petite cuvette à mercure de forme rectangulaire dont la largeur excédait peu celle de l'objectif de la lunette. Le but qu'on s'était proposé était évidemment de soustraire le bain de mercure aux ébranlements qui auraient pu être communiqués au parquet. Précaution insuffisante et inutile : la surface du mercure, ainsi que le constate Y. Villarceau[2], est plus calme lorsque le bain repose sur le parquet que sur l'appareil de suspension porté par le pilier. M. Le Paige a confirmé le fait en constatant

[1] Séguin et Mauvais, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. XXXV, p. 503.

[2] Yvon Villarceau, **2**, *Annales de l'Observatoire de Paris* (Observations), t. XII, p. 60.

tout récemment que les images étaient plus nettes ou au moins aussi nettes lorsque le bain reposait sur le plancher au lieu d'être rattaché au pilier.

Pritchard plaçait sa cuvette amalgamée sur une couche de sable, dispositif auquel il ajoute une grande importance, puisqu'il permet de régler l'horizontalité du plateau et qu'il atténue les trépidations.

M. P. Gautier[1] a donné du problème une solution simple et pratique, à laquelle l'amiral Mouchez accordait une grande valeur. Le bain Gautier (fig. 81) se

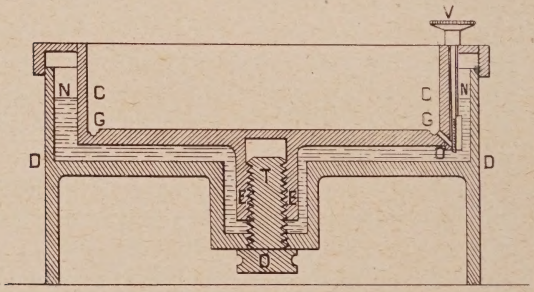


Fig. 81.

compose de deux cuvettes cylindriques de fonte CC, DD placées l'une au-dessus de l'autre, et d'un diamètre un peu différent. La cuvette inférieure DD, la plus grande, qui contient la provision de mercure, est munie à son centre d'un axe vertical taraudé T sur lequel se visse l'écrou EE, soudé au centre de la face inférieure de la

[1] Mouchez, *Bull. astr.*, t. II, p. 549; voir aussi *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. CII, p. 147.

cuvette CC. Celle-ci est séparée de son rebord par une gorge circulaire GG et percée d'un ajutage O coudé de 4 à 5 millimètres de diamètre. Quand on fait tourner la cuvette CC en la vissant, elle descend dans le mercure qui monte par O et forme dans le fond de cette cuvette la surface réfléchissante sur laquelle on pointe la lunette. Une vis V dont la tête émerge de la cuvette sert d'obturateur à l'ouverture O, afin d'empêcher, dans l'intervalle des observations, l'introduction de la poussière. La couche de mercure ainsi introduite, étant puisée par le tube O au-dessous de la surface NN, est dégagée de toute impureté et donne de très belles images. Quant aux trépidations du sol, elles se trouvent complètement annulées par le demi-flottage de la cuvette CC. Pour que cet heureux effet se produise, il faut en effet que le pas de vis ne soit ni trop serré ni trop lâche. Trop serré, il rendrait les deux cuvettes solidaires, ne formant qu'un seul corps rigide, et alors les vibrations se transmettraient comme dans un bain ordinaire; si au contraire l'écrou est trop lâche, ce qui revient à laisser flotter librement la deuxième cuvette dans la première, les mouvements du sol se transmettent en produisant des ondulations plus lentes et plus longues; la cuvette supérieure, avec la couche mince de mercure, semble alors dans un état d'équilibre instable qui ne permet plus l'immobilité des images réfléchies. M. Robert Ellery[1] avait adopté, pour le bain de mercure du Cercle méridien de l'Observatoire de Melbourne, un système de suspension

[1] Ellery, *Bull. astr.*, t. III, p. 377; voir aussi *The Observatory*, vol. IX, p. 333.

à bandes de caoutchouc qui éliminait les grandes perturbations, mais n'annulait pas les petites trépidations; l'emploi du bain Gautier lui a permis d'obtenir d'excellentes observations du nadir, à toute heure du jour et de la nuit. M. Périgaud[1] ne pense pas que le calme des images puisse être attribué au flottage partiel de la cuvette, mais simplement à la faible épaisseur de la couche mercurielle qu'il est facile d'obtenir grâce à la rigole circulaire qui borde le fond de la cuvette flottante. C'est aussi l'avis de M. Küstner[2], qui obtient les meilleures images en réduisant la couche à un quart de millimètre, ce qui exige qu'on s'assure que la tension superficielle n'altère pas l'horizontalité de la surface libre du mercure, c'est-à-dire que par suite des actions capillaires cette surface ne se déforme pas. Nous pouvons ajouter que l'emploi du bain Gautier au Grand Instrument méridien de l'Observatoire de Paris nous a donné de très bons résultats, mais qu'il est rarement possible d'observer le nadir, surtout pendant le jour, lorsque la couche de mercure n'est pas réduite à son minimum d'épaisseur. Il est d'ailleurs facile en dévissant la cuvette, après quelques tâtonnements, de se rendre compte du point où la couche se brise; on doit pour obtenir de belles images se rapprocher aussi près que possible de cette position critique.

Les considérations qui précèdent ont conduit M. Périgaud[1] à imaginer un nouveau bain de mercure, combinaison du bain Villarceau et du bain Gautier,

[1] Périgaud, **4**, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. CVI, p. 919.

[2] Küstner, **3**, *Vierteljahrsschrift der astronomischen Gesellschaft*, 25e année, p. 91.

avec lequel on peut obtenir un liquide très propre et en couche très mince. L'ancien plateau du bain Villarceau est remplacé par un plateau analogue à la cuvette intérieure du bain Gautier, c'est-à-dire qu'il est séparé de son rebord par une rigole circulaire d'un demi-centimètre de large à sa partie supérieure. Le récipient du mercure n'est pas modifié. Le chariot porte des vis de réglage qui permettent de rendre le plateau sensiblement horizontal. Après avoir nettoyé le plateau, on agit lentement sur la vis de pression du récipient; le mercure emplit d'abord la rigole, puis s'étale sur le fond du réservoir. Lorsque le plateau est complètement recouvert, on cesse d'agir sur la vis, on attend quelques instants que la couche soit bien équilibrée, puis on détourne la vis de pression pour faire rentrer le mercure partiellement. Dans l'appareil employé par M. Périgaud, il fallait quatre tours de la vis pour remplir le plateau, et l'on pouvait détourner de trois tours et un quart sans que le miroir se brisât, sans que l'horizontalité fût altérée quoique l'épaisseur de la couche finale ne fût plus que les $\frac{5}{16}$ de la première. Si l'on dépassait la limite de trois tours et un quart, il y avait rupture brusque du miroir. L'horizontalité du plateau est une des conditions de succès; il faut aussi qu'il soit extrêmement net, un petit grain de sable fait rompre la couche de mercure. M. Ch. Wolf considère les résultats obtenus par M. Périgaud comme absolument concluants : le bain pelliculaire donne la solution, longtemps cherchée, de l'emploi du bain de mercure pour obtenir la direction absolue de la verticale et pour observer les étoiles par réflexion. Il restait

cependant à établir que la couche est absolument indépendante de la direction du plateau et s'équilibre dans un plan toujours le même, qui ne peut être que le plan horizontal. Jabely[1] et M. Simonin firent, en 1894, une série de comparaisons du bain Périgaud avec le bain de mercure de l'Observatoire de Nice, simple cuve en fonte qui repose directement sur le rocher. De 99 comparaisons effectuées, il résulte que la différence des résultats obtenus avec les deux bains n'est que de 0″,01, différence absolument insensible. Des expériences analogues faites à Paris permirent de conclure à l'identité du bain ordinaire et du bain pelliculaire. De plus, sur le conseil de M. Wolf, M. Périgaud[2] a confirmé ces assertions de la façon suivante. Après avoir déterminé le nadir dans les conditions ordinaires avec le bain à couche mince, il inclinait le plateau au moyen de la vis de réglage et dans le sens Nord-Sud d'une quantité notable, après quoi il exécutait dix nouveaux pointés pour avoir un nouveau nadir; tournant alors la vis en sens contraire, il faisait une nouvelle opération. Dans les trois cas, le nadir est resté le même. Enfin les nombreuses séries d'observations par réflexion, obtenues avec le nouveau bain, fournissent une nouvelle preuve de la fixité et de l'horizontalité de sa surface. Nous devons ajouter cependant que des expériences faites par M. Marcuse l'ont conduit à douter de cette horizontalité. La priorité de l'invention du bain pelliculaire a été revendiquée par MM. Campos Rodrigues et Oom[3],

[1] Jabely **1** et Simonin, **1**, *Bull. astr.*, t. XIII, p. 129.

[2] Périgaud, **8**, *Bull. astr.*, t. XIII, p. 132.

[3] Campos Rodrigues et Oom, *Observations méridiennes de la planète Mars en 1892*, voir *Bull. astr.*, t. XIII, p. 311.

qui auraient fait usage du bain à couche mince depuis 1884. M. Périgaud[1] fait remarquer d'abord que les astronomes portugais n'ont rien publié de 1884 à 1888 (année de la communication faite par M. Périgaud à l'Académie des Sciences), ensuite que le bain qu'il a imaginé est composé d'un plateau aussi plan que possible, tandis que dans le mémoire des astronomes portugais il est fait mention d'une cuvette légèrement concave. Il semble bien que d'après la forme de la cuvette la couche ne peut être considérée comme mince, au moins dans la partie centrale.

L'appareil idéal pour observer le nadir est, en principe, le bain de mercure à couche épaisse. L'étude du bain Gautier, fondé sur l'emploi d'une couche mince combiné avec un demi-flottage de la cuvette, a conduit M. Hamy[2] à chercher analytiquement s'il est possible de réaliser un flottage pouvant à lui seul produire un amortissement efficace. Nous ne pouvons reproduire ici la savante analyse de M. Hamy, nous nous bornerons à donner la description de l'appareil, dont les éléments ont été déterminés par le calcul. Des ressorts sont attachés en A, A′, A″, A‴ (fig. 82) à un support non représenté sur la figure ; au lieu d'un ressort, on en attache en réalité deux, de forces différentes, en chacun des quatre points, de façon que leurs vibrations s'amortissent en se contrariant. Les ressorts sont accrochés en C, C′, C″, C‴ à des montants BC, B′C′, B″C″, B‴C‴

[1] Périgaud, 9, *Bull. astr.*, t. XIII, p. 416.

[2] Hamy, 9, *Bull. astr.*, t. XV, p. 172; voir aussi *Comptes rendus de l'Acad. des Sciences* (Paris), t. CXXV, p. 760; t. CXXXVI, p. 990, et *Annales de l'Observatoire de Paris* (Mémoires), t. XXV, p. B. I.

faisant corps avec la cuvette. Un amortisseur Q, vissé en G à la cuvette, plonge dans le vase de verre V contenant un mélange visqueux de goudron et d'huile et reposant sur le socle du support. Le réglage de l'appareil consiste à amener le centre de gravité G du système à se trouver sur la surface du mercure. Le déplacement des masses *m* permet d'effectuer ce réglage lors de la construction de l'appareil. Les premières expériences exécutées à l'Observatoire de Paris par MM. F. Boquet, Lancelin et Oltramare ont complètement confirmé les prévisions de la théorie. Pendant deux jours consécutifs, les images fournies par le nouveau bain à couche épaisse ont été observables, à toutes les heures de la journée et de la soirée, dans les mêmes conditions de netteté que les images fournies par le bain à couche mince, alors que le bain de mercure ordinaire à couche épaisse ne permet à aucun moment d'observer le nadir à l'Observatoire de Paris. Les expériences continuées depuis bientôt dix ans au Cercle méridien du jardin ont montré la supériorité incontestable du bain de M. Hamy sur tous les autres appareils.

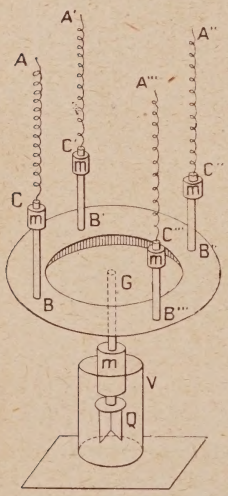


Fig. 82.

65. **Influence de la situation du bain par rapport à la surface du sol.** — M. Bigourdan[1] a fait, à l'Observatoire de Paris, une étude particulière des bains à couche épaisse, situés à diverses profondeurs. Les ondulations dont nous avons déjà parlé, oscillations assez régulières, assez lentes (de $0^s,25$ à $0^s,50$ de durée), ont une amplitude variable de $2''$ à $3''$ en moyenne, qui peut atteindre parfois $10''$ et $12''$, même à 28^m au-dessous du niveau du sol (anciennes carrières au-dessous de l'Observatoire). Quant aux vibrations, elles sont rares dans les couches profondes, peu prononcées, et ont une amplitude très faible; mais à mesure qu'on se rapproche de la surface, cette amplitude augmente au point d'atteindre l'amplitude même des ondulations; alors les fils réfléchis sont tout au plus visibles par intermittences, et tout pointé sur ces fils devient complètement impossible. Les vibrations nombreuses, même lorsque leur amplitude est faible, rendent les images diffuses, difficiles à voir; elles finissent par effacer complètement les fils réfléchis.

Dans le jour, à la profondeur de 28^m, les ondulations ont une amplitude moyenne de $3''$ à $4''$; elles s'éteignent graduellement dans la nuit. Les vibrations sont généralement assez rares, excepté au moment du passage des trains du chemin de fer souterrain de Paris à Sceaux, ou du chemin de fer sur route de Paris à Arpajon, dont les voies sont assez rapprochées de l'Observatoire. Lors de ces passages, tout pointé un peu précis est impossible. Les ondulations, qui varient fréquemment de direction et d'amplitude, présentent plusieurs types

[1] Bigourdan, 1, *Bull. astr.*, t. XVI, p. 210.

dont l'un est particulièrement remarquable : à chaque ondulation, les images des fils se déplacent assez lentement dans le même sens, puis reviennent très rapidement à leur position première, comme si le bain était une matière élastique tirée pendant quelque temps et qu'on laisserait reprendre instantanément sa position d'équilibre. A mesure que la circulation autour de l'Observatoire devient moins active, les ondulations diminuent graduellement, mais les fils réfléchis ne deviennent à peu près complètement calmes qu'à partir de 2 heures du matin. M. Bigourdan pense qu'il suffirait de placer un bain de mercure ordinaire à 12^m ou 15^m de profondeur pour le soustraire à l'influence des vibrations. Même en pleine campagne, il semble que ce sont surtout les couches superficielles qui transmettent les trépidations les plus gênantes; et là, des fossés de 3^m à 4^m de profondeur, isolant les instruments, pourraient améliorer considérablement les images. Mais à Paris cette profondeur serait probablement insuffisante. Les essais infructueux faits par Le Verrier semblent le démontrer, quoique Villarceau attribue à la profondeur des tranchées d'isolement (à l'Est et au Sud de l'Observatoire) une légère amélioration des images réfléchies. A l'époque de la construction du chemin de fer souterrain de Paris à Sceaux, on a pratiqué entre l'Observatoire et la ligne une tranchée profonde, descendant au-dessous du niveau du ballast et remplie de sable. Les expériences que nous avons faites à la demande de Tisserand nous ont montré que le passage des trains était sans influence sensible sur l'observation du nadir avec le bain pelliculaire.

66. **Influence de la nature du sol, de l'agitation de l'air, des variations de température sur la détermination du nadir.** — Si l'on admet, avec M. Bigourdan, que les couches superficielles sont le principal agent de transmission des vibrations, il est logique de penser que la nature du sol des voies de communication dans le voisinage d'un observatoire a une influence marquée sur la qualité des images. Ce n'était pas l'avis de Villarceau qui, au sujet du macadamisage des rues voisines de l'Observatoire, vers 1854, dit que cet essai d'amélioration de la stabilité du bain de mercure a plutôt réussi à affranchir du bruit des voitures qu'à maintenir la surface du mercure dans un état convenable. M. Bigourdan[1] a repris l'étude de cette question au moyen de deux instruments identiques placés côte à côte, mais dont l'un était porté par un pilier sans fondation, tandis que l'autre reposait sur un pilier enfoncé profondément dans le sol et complètement isolé sur toute sa hauteur. Le pilier isolé, avec bain placé à une certaine profondeur, présente un grand avantage dans le cas de troubles produits par des causes voisines; cet avantage est peu prononcé pour les causes éloignées. Le pavage en bois est, de beaucoup, celui qui donne le moins de trépidations; puis vient le macadam et, enfin, le pavage en grès.

Le vent a une influence très marquée sur la qualité des images. Son action peut se faire sentir de deux manières : vibration du sol par l'intermédiaire des arbres ou des bâtiments voisins de l'instrument, agitation directe de la surface libre du mercure. Il est facile

[1] Bigourdan, **2**, *Bull. astr.*, t. XVII, p. 5.

de supprimer en partie la seconde cause en enveloppant le bain et le tube porte-objectif dans un manchon. Ce n'est que par une installation bien comprise d'un observatoire qu'on peut atténuer les effets de la première. La salle méridienne de l'Observatoire de Paris est abritée du vent d'Ouest par le bâtiment principal, massif de pierres que le vent ne saurait agiter; elle est exposée aux autres directions du vent. Dans ces dernières conditions, l'observation du nadir est beaucoup plus difficile, souvent impossible.

En résumé, dans l'état actuel de la science, le bain de M. Hamy est, de tous les appareils proposés pour l'observation du nadir, le seul qui permette sûrement l'emploi de la couche épaisse. M. Bigourdan[1] a proposé de modifier le mode de suspension du bain de M. Hamy, pensant qu'on pourrait gagner encore en multipliant les effets d'amortissement, au moyen de plusieurs suspensions analogues convenablement superposées les unes aux autres. M. Bigourdan a obtenu aussi d'excellents résultats avec une unique suspension à ressorts (bain Hamy), portant le mercure dans une cuvette amalgamée, mouillée par le liquide. L'amélioration des images produites par ce genre de cuvette s'ajoute à celle produite par les ressorts.

On a essayé aussi d'autres liquides que le mercure pour la formation des bains. On pouvait espérer que les liquides visqueux seraient moins mobiles. M. de Konkoly a fait usage de bain d'huile mélangée avec de la suie très fine. Des expériences faites récemment dans le laboratoire de M. Lippmann par MM. Aubert et

[1] Bigourdan, 3, *Bull. astr.*, t. XIX, p. 275.

Ebert avec de l'huile de vaseline semblent avoir donné de bons résultats. La surface de ces liquides étant bien moins réfléchissante que celle du mercure, on est obligé d'employer un éclairage très intense.

Un point sur lequel Copeland[1] appelle l'attention des observateurs, c'est d'avoir soin de maintenir autour du bain une ventilation suffisante, qui, bien entendu, ne doit pas aller jusqu'à agiter la surface du liquide. Cette condition est difficile à concilier avec l'emploi du manchon isolant. Ce qu'il est surtout important d'éviter, c'est de placer des lampes dans le voisinage du bain dans les observations par réflexion.

C'est un fait bien établi que très souvent la lecture au pôle ou collimation polaire, déterminée comme nous l'expliquerons plus loin, varie d'une façon sensible du début à la fin de la soirée. La température subissant généralement une variation dans le même intervalle, on a pu penser à rapprocher les deux faits. Dès 1859, on trouve une étude de cette question dans les *Annales* de l'Observatoire de Paris. La simple inspection des lectures correspondant à l'observation du nadir, faite au Cercle mural de Gambey, montre qu'elles varient avec la température. Les observations faites avec régularité, au commencement et à la fin des séries d'observation, il importait de connaître la marche de la variation par rapport au mouvement de la température extérieure. Pour y arriver, on a considéré toutes les circonstances dans lesquelles l'observation du nadir avait été faite au commencement et à la fin de la série par un même observateur. En mettant en regard les

[1] Copeland, 1, *Monthly Notices*, vol. XLIV, p. 415.

variations thermométriques et celles de la lecture nadirale, on a constaté d'une façon certaine que la lecture au nadir diminue de o″,44 quand la température augmente de 1°, résultat d'accord avec les observations faites de 1856 à 1858. En 1860, on change les microscopes, et la variation nadirale passe de o″,44 par degré à o″,26.

Nous avons fait, il y a quelques années, un examen des variations de la collimation polaire du Grand Cercle méridien de l'Observatoire de Paris. Nous sommes arrivé à cette conclusion que, du début à la fin de la soirée, la variation est peu sensible, 1 ou 2 dixièmes dans les mois d'été, tandis que dans les mois d'hiver elle s'élève jusqu'à 8 dixièmes. MM. Oltramare[1] et Lancelin ont entrepris, en 1897, au même instrument, une série d'observations pour la détermination de distances polaires absolues et la recherche de la latitude de l'Observatoire. Ils ont été amenés à déterminer les causes de variations notables relevées dans la lecture du nadir, non seulement d'un jour à l'autre, mais même dans un intervalle de quelques heures. Ces variations pouvaient tenir à des causes multiples qu'il s'agissait de préciser et de faire disparaître si possible. Chaque observation était faite en double, en déplaçant l'instrument de quelques secondes après la première détermination; on a assuré le serrage convenable de l'objectif; on s'est assuré que les tambours des microscopes ne subissaient pas de déplacement; on a rectifié la mise au foyer. Les observateurs ont alors été amenés à conclure que les variations devaient être rapportées à des

[1] Oltramare, Lancelin et Chatelu, *Annales de l'Observatoire de Paris* (Observations de 1897), p. B. 3.

dilatations du pilier qui supporte les microscopes. La suppression d'un bec de gaz servant au calage et fixé sur ce pilier a eu pour effet de diminuer notablement l'amplitude des variations.

De plus de 800 observations faites tous les jours et par tous les temps, dans l'après-midi et dans la soirée, il ressort que, l'équilibre thermique étant établi, les divergences étaient nulles ou de très faible amplitude. C'est ce qui arrivait, en particulier, l'après-midi ou lorsque, par suite de temps couvert, les trappes restaient fermées. Par contre, dès que la variation de température s'accentuait, on voyait varier le nadir. La représentation par une formule de ces variations des lectures de la verticale en fonction de la température est difficile. Les contractions ou dilatations du pilier ne s'opèrent que progressivement, et il y a un retard variable dans leur effet suivant les différences de température entre l'extérieur et l'intérieur. Il est en outre impossible d'être renseigné sur ce qui se passe dans les couches profondes et dans les diverses parties. Cette conclusion, il faut le remarquer, est en contradiction avec celle donnée par Yvon Villarceau pour le Cercle de Gambey. Quoi qu'il en soit, la variation de la lecture nadirale avec la température est un fait dont il y a lieu de s'inquiéter; la cause en est très probablement dans le jeu des piliers, du cercle, des microscopes, non et évidemment dans le bain de mercure lui-même.

67. **Installation du bain de mercure.** — Si le bain de mercure ne devait servir qu'à l'observation du nadir, il suffirait de l'installer à poste fixe dans la direction de la verticale de l'instrument; mais pour

l'observation des étoiles par réflexion, il est nécessaire de pouvoir le déplacer facilement dans le sens de la méridienne. Pour cela, on le place sur un chariot qui, dans la plupart des observatoires, peut se mouvoir sur des rails orientés suivant la ligne Nord-Sud. Dans l'intervalle compris entre les deux rails, et parallèlement à ceux-ci, c'est-à-dire suivant la méridienne, on place une bande métallique graduée qui indique la position que doit occuper le chariot pour que l'étoile soit observable par réflexion sur le mercure. Il est facile d'établir cette graduation. On lui donne comme origine le pied N de la verticale passant par le milieu O de l'axe de rotation. Soient OE la direction de la lunette quand elle est pointée sur l'étoile E, OC sa position quand on observe la même étoile par réflexion sur le bain de mercure MM, OZ et CZ′ les verticales respectives de O et de C. Les droites OZ et CZ′ sont parallèles, ainsi que les droites OE et CE′; le triangle rectangle CNO donne la relation

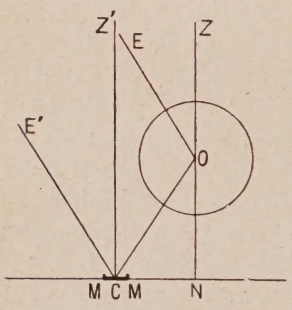


Fig. 83.

$$NC = ON \operatorname{tang} CON,$$

ou, en appelant d la longueur NC, l la distance constante ON, et z la distance zénithale ZOE de l'astre,

$$d = l \operatorname{tang} z.$$

Il suffira de calculer les valeurs de d pour des valeurs de z de 5° en 5°.

Le dispositif que nous venons de décrire, et qui consiste à placer le bain de mercure sur le châssis d'un chariot, ne permet pas de faire varier la distance de la surface réfléchissante à l'objectif; les vis de réglage permettent seulement d'obtenir l'horizontalité du plateau. Dans l'un des bains employés à l'Observatoire d'Uccle[1], la cuvette peut être élevée ou abaissée tout en gardant son horizontalité, grâce à un système analogue à celui de la balance de Roberval.

68. **Oculaire nadiral.** — Pour faire l'observation du nadir, c'est-à-dire amener en coïncidence l'un des fils de déclinaison (fil fixe ou fil mobile) avec son image, on doit modifier l'oculaire de façon à voir l'image du fil en noir sur champ brillant. On remplace dans ce but l'oculaire ordinaire par un oculaire nadiral. Cet appareil est formé d'un microscope. Un miroir incliné à 45° et percé en son centre pour démasquer la partie centrale envoie à l'objectif les rayons d'une source lumineuse placée sur le côté. Le champ est alors éclairé, mais la partie des fils tournée vers la surface réfléchissante est obscure; on les voit donc par réflexion en noir comme les fils directs, ils sont cependant un peu moins accentués. On n'a d'ailleurs pas l'image des fils dans toute leur longueur à cause du réflecteur, mais l'étendue observable est suffisante pour qu'on puisse effectuer les pointés. On donne souvent au microscope nadiral le même grossissement qu'à l'oculaire ordinaire. Il paraît pourtant avantageux d'employer un plus fort grossissement.

[1] Philippot, *Annuaire de l'Observatoire royal de Belgique pour 1907*, p. 329.

Au lieu de changer l'oculaire, on peut lui adapter simplement un appareil nadiral composé d'une lame de verre VV, à faces parallèles, inclinée à 45° sur l'axe de la lunette. Une petite lentille L renvoie la lumière de la source S, en faisceau parallèle, sur la glace VV qui la réfléchit suivant l'axe optique. L'appareil nadiral est monté sur une bague BB qui s'ajuste exactement sur

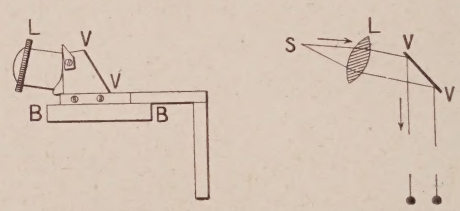


Fig. 84.

l'oculaire au-dessus de l'œilleton. L'orientation de la lentille par rapport à la source lumineuse s'obtient en tournant la bague.

L'éclairage nadiral joue un rôle important dans la détermination du nadir. Ce n'est que par un réglage convenable qu'on peut arriver à voir les fils et leurs images avec la netteté voulue pour établir la coïncidence avec précision. Dans l'étude qu'ils ont faite du Cercle méridien du jardin de l'Observatoire de Paris, MM. Perchot et Ebert[1] ont constaté que chaque fil du micromètre donnait, par réflexion sur le bain de mercure, deux images colorées dont la distance variait avec

[1] Perchot, 2, et Ébert, 1, *Annales de l'Observatoire de Paris* (Observations de 1897 et 1898), p. D. 24; voir aussi *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. CXXVI, p. 27.

les déplacements de l'oculaire. La mise au foyer de la lunette, avec laquelle on pouvait, avec une bonne mise au point, réunir les deux images d'un même fil en une seule qui fût observable, ne convenait pas aux observations stellaires. Cette discordance provenait de la mauvaise disposition de l'éclairage du nadir. Une série de tâtonnements leur ont permis d'établir la coïncidence nécessaire entre les deux mises au foyer.

Pour éliminer autant que possible les erreurs provenant des pointés, M. Renan[1] a fait installer deux petites lampes électriques, l'une à l'Ouest, l'autre à l'Est, de manière à pouvoir observer le nadir avec l'une ou avec l'autre.

A l'Observatoire Washburn[2], on interpose entre la source lumineuse et la lentille de l'appareil nadiral un verre dépoli. L'éclairage du champ est alors plus uniforme. Lorsqu'on disposera de l'électricité comme source lumineuse, il y aura donc avantage à employer des ampoules à verre dépoli.

69. **Collimateur zénithal.** — Les difficultés que présente l'observation du nadir et l'incertitude des résultats obtenus ont conduit les astronomes à recourir à d'autres appareils, pour la détermination de la verticale, en pointant la lunette vers le zénith, au lieu de la pointer vers le nadir. On aura, par la comparaison des deux procédés, un contrôle précieux des observations. Nous avons décrit (§ 44) le collimateur imaginé

[1] Renan, **1**, et Ébert, **3**, *Annales de l'Observatoire de Paris* (Observations), année 1900, p. D. 5.

[2] Holden, **4**, *Publications of the Washburn Observatory of the University of Wisconsin*, t. II, p. 32.

par Faye en 1846 et qui est le premier appareil permettant de pointer le zénith.

Porro[1] a imaginé, quelques années après, un autre appareil, aussi fort ingénieux, mais dont la réalisation semble présenter quelques difficultés. Il place au-dessus de l'objectif d'une lunette dirigée vers le zénith une capsule très plate, dont le fond est une glace à faces parallèles et qui contient un liquide transparent. Les fils illuminés par un système particulier deviennent visibles par les réflexions qui ont lieu sur les trois surfaces de séparation des milieux ; il se produit ainsi trois images qui coïncideraient si les deux surfaces de la glace étaient bien parallèles et bien horizontales, et qui se confondraient avec le fil dont elles dérivent si la lunette était en même temps verticale. Mais, en employant un liquide et un verre dont les indices de réfraction soient très peu différents, la surface supérieure du verre ne produira ni image, ni réfraction appréciable ; il suffira donc d'amener à la coïncidence les deux images restantes avec le fil dont elles dérivent, pour que la lunette soit rigoureusement verticale. Le système d'illumination des fils[2] consiste à substituer des lames de verre aux lames métalliques porte-fils. Ces lames, travaillées sur leurs tranches, suivant des courbures convenables, permettent d'introduire normalement à l'axe optique de la lunette une tranche mince de lumière qui éclaire vivement les fils sans arriver autrement à l'œil de l'observateur ; d'où il suit que les

[1] Porro, **2**, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. XXXVI, p. 482.

[2] Porro, **1**, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. XXXII, p. 677.

fils paraissent d'un blanc d'argent dans un champ obscur, tant directement que par réflexion.

M. Deichmüller[1], à Bonn, au lieu d'observer le nadir, pointe la lunette sur le zénith au moyen d'un miroir zénithal. Voici le dispositif adopté : une plaque de verre noir est posée sur un bain de mercure contenu dans une cuvette annulaire. Celle-ci est portée par un support qu'un bras horizontal permet d'amener au-dessus de l'objectif de la lunette dirigée vers le zénith. On établit la coïncidence des fils (image directe et image réfléchie) dans une certaine position du miroir; puis on le fait tourner de 180° en azimut, et l'on effectue une nouvelle coïncidence. La moyenne des deux positions ainsi déterminées donnera le zénith vrai.

L'appareil de M. Deichmüller est d'une construction facile, les petites vibrations du miroir sont atténuées par sa masse; les grandes oscillations ont seules une influence sensible, mais la surface réfléchissante reste plane, les images oscillent, mais ne se troublent pas.

De tels avantages déterminèrent Lœwy à faire construire un miroir zénithal pour le Cercle méridien du jardin. Le dispositif est analogue à celui du miroir de M. Deichmüller. Le miroir, au lieu d'être en verre noir, est en verre argenté à sa partie inférieure. On le maintient dans une position déterminée au moyen d'un crochet pénétrant, sans pression, dans quatre entailles en croix creusées à la partie supérieure du flotteur qui supporte le miroir. Trois vis situées au sommet d'un triangle équilatéral limitent le mouvement du miroir sans le gêner. L'étude de cet appareil, faite par MM. Per-

[1] Deichmüller, *Astr. Nach.*, vol. CXLII, col. 145.

chot et Ebert[1], a mis en évidence la nécessité de régler avec le plus grand soin l'éclairage, pour que les mises au foyer par les étoiles et le miroir soient concordantes. Il faut aussi déplacer le miroir avec précaution. Les quatre entailles permettent de faire les observations dans deux directions perpendiculaires, chaque observation comportant, ainsi qne nous l'avons dit, deux positions du miroir à 180°.

Nous citerons encore le système de suspension de M. Schwarzschild[2], qui laisse le collimateur libre d'osciller; l'amortissement est réalisé à l'aide de palettes immergées complètement.

70. **Lecture du thermomètre. Aération de la salle.** — Pour déduire les distances polaires vraies de celles données par la lecture du cercle, il est nécessaire, ainsi que nous le dirons plus loin au sujet de la réfraction, de connaître la température et la pression barométrique au moment de l'observation. En réalité, dans une série d'observations, on n'effectue les lectures du thermomètre et du baromètre que deux ou trois fois par heure, à moins de variations brusques. Des appareils enregistreurs placés non loin de l'instrument permettent de se rendre compte de la marche probable du thermomètre et surtout de celle du baromètre. On doit de temps en temps, tous les deux ans par exemple, déterminer la correction du zéro des thermomètres. Ainsi

[1] Perchot, **2**, et Ébert, **1**, *Annales de l'Observatoire de Paris* (Observations 1897), p. D. 24.

[2] Schwarzschild, *Astr. Nach.*, vol. CLXIV, col. 1; voir aussi Lippmann, **4**, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. CXLIV, p. 873 et p. 1137.

que l'a fait remarquer Faye[1] un des premiers, et après lui Stone[2] et tant d'autres, c'est le pouvoir réfringent des couches d'air voisines de l'objectif ou intérieures au tube qu'il faut connaître, et non celui des autres couches. Il y a là une première indication sur l'emplacement à donner au thermomètre. On pourra donc le fixer dans une position moyenne correspondant à la région où on observe; quelques observateurs le suspendent près de l'objectif qu'il accompagne dans ses déplacements. Les lectures des thermomètres ne doivent pas être influencées par les lampes qui servent à l'éclairage des diverses parties de l'instrument. Le nombre de celles-ci d'ailleurs doit être réduit au minimum. Il est avantageux de lire les thermomètres à distance, un petit viseur convient bien pour cela. L'emploi de la lumière électrique présente évidemment de grands avantages, l'influence calorifique étant très faible.

Lorsqu'on veut effectuer une série d'observations, on doit dégager l'instrument de ses abris (trappes, fenêtres, toits mobiles) assez longtemps à l'avance, pour qu'au début de la série on puisse le considérer comme étant en équilibre de température avec l'air extérieur. La question de l'aération des salles d'observation a été réglementée par Le Verrier[3] pour l'Observatoire de Paris, dans le but d'établir la plus grande égalité possible entre l'air intérieur et l'air extérieur, et d'éviter que les rayons du Soleil ne tombent sur l'instrument et sur les

[1] Faye, 2, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* (Paris), t. XXXI, p. 401.

[2] Stone, *The Observatory*, vol. XI, p. 248; voir aussi 2, *Monthly Notices*, vol. XL, p. 333.

[3] Le Verrier, 2, *Instructions pour le service de l'Observatoire impérial de Paris et Marseille*, p. 15.

parois intérieures de la salle. Poisson[1] a, après Bessel, étudié l'influence que les inégalités de température peuvent produire sur un cercle gradué. Plus récemment, M. Leitzmann[2] a traité le même problème. Il y a à retenir de ce travail que le résultat est le même pour une plaque circulaire pleine que pour un cercle évidé (anneau plat et rayons). De son côté, Copeland[3] signale à l'attention des astronomes la nécessité d'obtenir une température uniforme autour du cercle de lecture et de discuter avec soin la disposition à adopter pour le thermomètre.

Les procédés actuels, d'après le général Tennant[4], ne donnent pas la température avec la précision voulue. M. Turner[5] a fait une étude des plus importantes sur la distribution de la température dans la salle méridienne de l'Observatoire de Greenwich. Les conclusions sont évidemment particulières à cette salle et ne présentent qu'un intérêt local; mais on devrait, dans chaque observatoire, faire la même étude, afin de se rendre compte, en quelque sorte, de la qualité de la salle d'observation : temps strictement nécessaire pour établir l'équilibre de température, influence sur les thermomètres de la réserve de chaleur des murs et de l'effet du vent, distribution des températures à l'intérieur de la salle, étude comparative des températures à l'intérieur et à l'extérieur, suivant les saisons ou la direction du vent. Pour ne citer qu'un fait, on avait constaté depuis

[1] Poisson, *Connaissance des Temps pour 1826*, p. 248.
[2] Leitzmann, **1**, Thèse de doctorat, Berlin.
[3] Copeland, **1**, *Monthly Notices*, vol. XLIV, p. 415.
[4] Tennant, *The Observatory*, vol. XI, p. 241.
[5] Turner, *The Observatory*, vol. XV, p. 33; voir aussi, **5**, *Monthly Notices*, vol. LIII, p. 424.

longtemps à Greenwich que la température baisse plus rapidement du côté Sud que du côté Nord. Aussi, comme conclusion, M. Turner insiste sur ce fait que l'astronomie d'observation doit, à l'heure actuelle, prendre en considération des petits détails trop longtemps négligés, et cette manière de voir est aussi celle de M. Christie. C'est dans ce même ordre d'idées que M. Van de Sande Bakhuyzen[1] a essayé de déterminer la forme moyenne du profil méridien des couches de niveau. M. Gonnessiat[2], dans une étude des variations de la latitude à l'Observatoire de Lyon, fait remarquer que la disposition des couches d'air dépend essentiellement de la forme de la salle, et qu'une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur n'affecte pas, dans la même proportion, la réfraction à toutes les hauteurs. L'installation de la salle méridienne à Lyon (pavillon isolé éclairé électriquement, trappe très large, quatre ouvertures latérales) permet, avec certaines précautions, de réaliser, à quelques dixièmes près, l'égalité de température entre l'air extérieur et celui de la salle. Cornu[3] a aussi appelé l'attention des astronomes sur les erreurs systématiques provenant d'une inégale répartition de la température à l'intérieur des salles d'observation. M. Hamy[4], à la suite de ce travail, a eu l'idée d'étudier l'action perturbatrice exercée sur les instruments par les radiations calorifiques émanant des lumières installées dans les salles méridiennes. Ses recherches lui ont

[1] Bakhuyzen (Van de Sande), **1**, *Astr. Nach.*, vol. LXXII, col. 241.

[2] Gonnessiat, **8**, *Bull. astr.*, t. XI, p. 241.

[3] Cornu, **1**, *Comptes rendus de la 10e conférence générale de l'Association géodésique internationale*, p. 642.

[4] Hamy, **8**, *Bull. Astr.*, t. XIII, p. 178.

démontré que l'échauffement communiqué aux lunettes modifie leurs caractères géométriques et peut provoquer des altérations de plusieurs secondes d'arc. Elles confirment les assertions de Cornu concernant les flexions et torsions systématiques produites par la dissymétrie des sources calorifiques. Les conclusions de ce travail sont de la plus haute importance. Les lumières ordinaires agissent peu sur les piliers de pierre à une distance supérieure à 1^m; mais on ne peut compter sur la stabilité d'un pilier soumis, pendant plusieurs heures, au rayonnement d'une lampe placée à quelques décimètres seulement de la pierre. Il en résulte qu'on ne doit jamais fixer une source de lumière, si faible soit-elle, sur les piliers d'un cercle méridien. Une expérience très facile à répéter a permis à M. Hamy d'avoir une idée de la grandeur des perturbations. Un bec de gaz papillon (200^{lit} à l'heure) était placé à $0^m,9$ de l'axe optique de la Lunette de Gambey (tube en laiton). On l'allumait et on l'éteignait alternativement pendant quelques minutes, et l'on pointait la mire après chaque période d'échauffement et de refroidissement. Une différence de $1'',8$ s'est manifestée entre les azimuts observés, mettant hors de doute l'existence d'un déplacement angulaire de l'axe optique de la lunette, sous l'influence des radiations calorifiques émanant de la source lumineuse. L'expérience répétée en plaçant le bec de gaz de l'autre côté de l'instrument, dans un emplacement symétrique du premier par rapport au méridien, on constata une perturbation identique, mais de sens contraire. Ainsi, la lampe qui sert à éclairer la pendule et les registres d'observations, généralement placée trop près de la lunette, peut provoquer des erreurs systématiques.

Il résulte encore des expériences de M. Hamy qu'il y a lieu d'éviter l'emploi des instruments en laiton. Le cuivre rouge, dont la conductibilité est très grande, rendrait presque impossibles les inégalités de température. On pourrait recouvrir les instruments existants d'une enveloppe de ce métal. L'emploi intermittent de lampes électriques semble actuellement le meilleur mode d'éclairage ; nous avons dit que ce procédé est déjà employé pour la lecture des microscopes de certains instruments méridiens.

Comme il n'est pas possible de modifier la plupart des installations d'instruments méridiens, on devra apporter, nous le répétons, la plus grande attention sur l'emplacement des thermomètres. M. Thackeray[1] a mis en évidence, par la discussion de longues séries d'observations, l'effet que peut produire une mauvaise installation du thermomètre sur la position d'astres, comme le Soleil et les planètes inférieures, observés à certains moments du jour. A Leyde, on note la température à trois thermomètres intérieurs, l'un à 8 mètres de hauteur, le second à l'objectif, le troisième au niveau de la salle. Ces exemples, que nous ne multiplierons pas, suffisent à mettre en évidence l'importance capitale de cette question.

71. **Lecture du baromètre.** — Le choix du baromètre est à peu près indifférent. Cependant, comme les observations se font souvent la nuit, que dans certains cas elles doivent être assez fréquentes, il est avantageux d'employer un baromètre dont la lecture puisse se faire

[1] Thackeray, *The Observatory*, t. XI, p. 252.

rapidement. Le baromètre de Fortin, à cause de l'affleurement, convient moins bien que le baromètre de Tonnelot à échelle compensée.

Le baromètre de Tonnelot, dont la première idée est de M. Renou, est un baromètre ordinaire à cuvette; la seule modification est dans la graduation. Soient d_c et d_t les diamètres respectifs de la cuvette et du tube et p leur rapport :

$$\frac{d_c}{d_t} = p.$$

Le rapport des surfaces s_c et s_t de la cuvette et du tube est donc :

$$\frac{s_c}{s_t} = p^2.$$

Les divisions de l'échelle ne sont plus des millimètres, mais des $\frac{p^2}{p^2+1}$ de millimètre. Une simple lecture de l'échelle donnera alors la pression barométrique en millimètres. Soit, en effet, h une certaine hauteur barométrique. Si le mercure s'élève de n divisions dans le tube, il s'abaissera dans la cuvette de $\frac{n}{p^2}$ divisions, et la distance entre le ménisque supérieur dans le tube et le niveau du mercure dans la cuvette sera de $n+\frac{n}{p^2}$ divisions; en millimètres cette distance aura pour expression :

$$\left(n+\frac{n}{p^2}\right)\frac{p^2}{p^2+1},$$

c'est-à-dire n millimètres. Dans la pratique on prend généralement p égal à 10 : l'échelle est donc divisée en $\frac{100}{101}$ de millimètres. Les divisions sont inscrites d'unités en unités; un vernier, dont on amène le bord inférieur à l'affleurement, permet d'évaluer les fractions. En faisant correspondre 20 divisions du tube à 21 divisions du vernier, on pourra apprécier les demi-dixièmes de millimètre.

Pour avoir avec précision la température du baromètre, on emploie un thermomètre à mercure dont le réservoir a le même diamètre que celui du tube barométrique. Ce thermomètre est appliqué soit sur la planchette d'appui du baromètre, soit sur la gaine même qui l'enveloppe.

Afin de placer le baromètre bien verticalement, on le suspend par un anneau : il prend de lui-même la position verticale. On l'y maintient à l'aide de trois vis calantes horizontales, situées à 120° les unes des autres sur une couronne métallique qui enveloppe la partie inférieure de la cuvette.

La lecture du baromètre ne se fait généralement pas à la température du thermomètre adopté pour donner la température de la lunette. On trouve dans tous les traités de physique (voir **E. S.**, *chaleur*) la formule qui permet de ramener à la température θ' une lecture barométrique observée à la température θ. Dans la pratique des observations méridiennes, cette réduction doit se faire rapidement. Voici un exemple de la façon dont on peut procéder. Soit h' la hauteur de la colonne mercurielle à θ'° qui exerce la même pression que la hauteur h à θ°. On a, en désignant par v' et v les

volumes des colonnes de mercure aux deux températures :

$$\frac{h}{h'} = \frac{v}{v'};$$

mais, α étant le coefficient de dilatation cubique du mercure,

$$\frac{v}{v'} = \frac{1 + \alpha\theta}{1 + \alpha\theta'};$$

alors

$$h' = h\frac{1 + \alpha\theta'}{1 + \alpha\theta}.$$

Le coefficient α est très petit $\left(\frac{1}{6000}\text{ environ}\right)$; on peut écrire :

$$h' = h(1 + \alpha\theta')(1 - \alpha\theta) = h(1 + \alpha\theta' - \alpha\theta - \alpha^2\theta\theta'),$$

ou en négligeant encore le terme en α^2,

$$h' = h + h\alpha(\theta' - \theta).$$

Si nous admettons comme limites extrêmes de h les valeurs $0^m,725$ et 0^m775 (limites des pressions observées à Paris), $h\alpha$ est compris entre 0,12 et 0,13, soit $\frac{1}{8}$ environ. Donc, à Paris, pour avoir la hauteur barométrique h' à θ'^o, il suffit d'ajouter à la hauteur h le huitième de la différence des températures. Le signe du second terme est donné par la différence $\theta' - \theta$. Il sera facile d'établir une règle analogue pour une autre pression moyenne. Ainsi à Quito (pression moyenne $0^m,554$), on prendra le $\frac{1}{11}$ de la différence.

72. **Prisme redresseur ou à réversion.** — On emploie ce prisme pour renverser la direction apparente du mouvement d'une étoile, c'est-à-dire par exemple pour qu'un déplacement de la droite vers la gauche, comme celui d'une étoile équatoriale, devienne un mouvement de gauche à droite. Son emploi joue un rôle dans l'étude des équations personnelles dont nous nous occuperons au livre IV. Cet appareil se compose d'un prisme triangulaire à bases obliques dans lequel les faisceaux émergents se réfléchissent successivement sur les faces latérales, de manière à se croiser dans l'intérieur du prisme. Une monture permet de l'adapter à l'oculaire de la lunette.

CHAPITRE III

L'OBSERVATION DES ASTRES EN DISTANCE POLAIRE, DÉCLINAISON OU DISTANCE ZÉNITHALE.

73. **Mode de pointé.** — En principe, pour avoir la distance angulaire d'une étoile à l'un des points origines, pôle ou zénith, on bissecte l'astre avec le fil fixe horizontal au moment du passage au méridien et l'on fait la lecture du cercle. Mais cette manière de procéder a le grave inconvénient de ne permettre de faire qu'un seul pointé sur l'objet, d'où une incertitude tenant soit aux ondulations de l'image, soit à l'erreur résultant de ce que l'observateur ne met pas exactement le fil sur le centre du petit disque lumineux à observer. Ces deux causes d'erreur sont évidemment d'ordre accidentel; on augmentera alors la précision de l'observation en pointant plusieurs fois l'étoile avec le fil mobile le plus près possible du méridien, c'est-à-dire lorsque l'astre est à sa culmination et que l'on peut, sans erreur sensible, considérer sa hauteur comme constante pendant quelques secondes. Le nombre des pointés varie suivant la vitesse de l'étoile, la plus ou moins grande rapidité avec laquelle on peut lire le micromètre, la qualité de

l'image. Pour les étoiles équatoriales ou suffisamment éloignées du pôle, le micromètre est disposé de façon qu'on puisse faire de deux à cinq pointés entre les deux séries de passage avant et après le méridien. Les étoiles circompolaires sont observées aussi près que possible du méridien; mais, en raison de la lenteur de leur mouvement apparent, on peut effectuer un plus grand nombre de pointés, dix, quinze, vingt et plus. Comme il est difficile de juger à l'œil avec quelque précision, du moment où l'étoile circompolaire est au méridien, on doit noter les heures des pointés afin de pouvoir, dans la réduction, tenir compte de ce fait que l'étoile a été pointée avant ou après le méridien et non à sa culmination ou à son passage inférieur.

Pour rendre comparables entre elles les observations faites au fil mobile, on doit les rapporter à un fil idéal correspondant à une lecture déterminée l_o du tambour de la vis micrométrique. Si l'on voulait rapporter les observations à un fil réel, il faudrait déterminer la lecture du tambour correspondant à la coïncidence du fil mobile et du fil réel origine. Soient l_t la lecture du tambour lorsque le fil mobile bissecte l'étoile, k la valeur en secondes d'arc du tour de vis et l_c la lecture du cercle, on devra augmenter ou diminuer l_c de $(l_t - l_o)\, k$. En général k est égal à $1'$ plus ou moins une petite quantité $\varkappa$; on combinera d'abord l_c avec la différence $l_t - l_o$ et on corrigera le résultat de la petite quantité $(l_t - l_o)\, \varkappa$. On fixe aisément *à priori* les signes des corrections $(l_t - l_o)$ et $(l_t - l_o)\, \varkappa$ en tenant compte du sens de la graduation du cercle et du déplacement qu'il faudrait donner à la lunette pour mettre réellement l'objet sous le fil idéal.

Pour enregistrer les observations d'astres faibles,

comme les petites planètes, on se sert d'un pointeur, l'astronome ne pouvant pas effectuer la lecture du tambour dans l'obscurité. Le pointeur consiste en une petite tige circulaire dont une extrémité placée en regard du tambour est imprégnée d'encre d'imprimerie. L'autre extrémité est terminée par un bouton. Cette tige est dirigée suivant un rayon du tambour. La pointe traverse un petit réservoir d'encre grasse. Un ressort la maintient à une certaine distance du tambour et la ramène en arrière lorsqu'on cesse d'agir sur le bouton après avoir enregistré un pointé.

Lorsque le fil mobile est placé sur l'astre, l'observateur presse le bouton et marque ainsi un point sur le tambour.

Il répète cette opération trois ou quatre fois, plus si possible.

L'observation terminée, on relève les pointés. Le pointeur n'est pas en regard de l'index, mais à une certaine distance λ. Soit l' la moyenne des lectures au pointeur; on devra, si l' est plus grand que la lecture l à l'index, corriger la lecture l du cercle de $\left[(l' - \lambda) - l_o\right] k$. La distance λ se détermine de temps en temps en plaçant la division l_o en regard de l'index et en agissant sur la pointe. Il est bon de procéder par répétition en amenant chaque fois le point sous l'index.

74. **Mode d'observation des différents astres.** — La première précaution à prendre, c'est de mettre l'oculaire au point. Nous avons dit que le réticule se compose de fils horizontaux et de fils horaires situés les uns et les autres dans le plan focal de l'objectif. En réalité, pour éviter le frottement des fils les uns sur les

autres, ce qui pourrait produire des ruptures, les fils d'ascension droite et les fils de déclinaison sont dans deux plans parallèles très rapprochés, distants de moins d'un dixième de millimètre. Il y a cependant lieu de tenir compte de ce fait dans la mise au point.

Les étoiles, quel que soit leur éclat apparent, s'observent en les pointant comme nous l'avons indiqué dans le § 73. On règle l'éclairage du champ suivant l'éclat de l'astre. Les planètes dont le diamètre apparent est très petit, comme Neptune (2″,3) et Uranus (4″), sont pointées à leur centre comme des étoiles. Pour les astres très faibles, on fait usage des fils lumineux sur champ obscur.

On observe les deux bords des planètes qui présentent un disque parfait, Saturne, Jupiter et Mars, en mettant le fil mobile tangent successivement sur le bord supérieur et sur le bord inférieur. On peut aussi pointer un bord avec le fil fixe (un seul pointé) et l'autre avec le fil mobile. La position des anneaux de Saturne rend quelquefois l'observation des deux bords assez difficile.

Enfin, au lieu d'un seul fil mobile, on a souvent un couple de fils distants de 12″ à 15″ et que nous désignerons toujours par les noms de fil supérieur et fil inférieur, tels qu'ils sont placés lorsqu'on regarde vers l'horizon Sud. Avec ce dispositif, on pointe le bord supérieur apparent avec le fil supérieur, le bord inférieur avec le fil inférieur; les pointés se font un peu plus rapidement. Il est nécessaire pour la réduction des observations de connaître la distance des fils du couple; on l'obtient en les amenant successivement en coïncidence avec un fil horizontal fixe. La différence des lectures au tambour, corrigée de la valeur du tour de la vis, donne

en secondes d'arc cette distance. Lorsqu'on a observé les deux bords (supérieur et inférieur) des planètes Mars, Jupiter et Saturne, la différence des lectures, convenablement corrigées, donne le diamètre vertical de ces astres.

Pour les planètes inférieures Mercure et Vénus, on pointe le bord le mieux éclairé. On opère de même pour la Lune.

Il n'est pas toujours possible de déterminer à la simple inspection de l'astre celui des deux bords qui est convenablement éclairé, mais on peut le connaître aisément par le calcul, à l'aide des éphémérides. Nous résoudrons ce problème dans le prochain paragraphe.

Lorsque le micromètre possède un couple de fils mobiles horizontaux, quelques observateurs préfèrent placer l'objet entre les deux fils (fig. 85) en s'efforçant de le mettre à égale distance. Cette méthode a l'avantage de ne pas masquer l'astre lorsqu'il est faible, et c'est presque toujours ainsi qu'on est obligé de pointer les petites planètes. Nous verrons au livre IV l'inconvénient de ce mode de procéder. Dans l'observation du Soleil ou de la Lune, on doit amener l'un des fils du couple à être tangent au bord qu'on observe. Quelques astronomes, et notamment Le Verrier[1], recommandent d'éviter d'amener l'un des fils sur le disque et l'autre en contact avec le bord, la présence de ce fil noir sur le disque pouvant influencer le pointé. Nous croyons cette

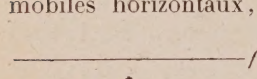


Fig. 85.

[1] Le Verrier, 2, *Instructions pour le service de l'Observatoire impérial de Paris et Marseille*, note de la page 88.

précaution excessive. En général, on évite d'observer le bord d'un astre de grand diamètre entre les deux fils.

Les fils des micromètres sont d'une grande finesse; si cependant on jugeait à propos de tenir compte de leur épaisseur, il faudrait corriger les pointés de cette demi-épaisseur suivant que le bord a été mis en contact avec la partie supérieure ou avec la partie inférieure du fil. Cette demi-épaisseur s'évaluera à l'aide d'un fil horizontal fixe, en amenant alternativement le bord supérieur du fil mobile en contact avec le bord inférieur du fil fixe, et le bord inférieur du premier avec le bord supérieur du second. La correction est d'ailleurs d'un ordre de petitesse généralement de beaucoup inférieur à celui de l'incertitude des pointés, et le plus souvent il serait impossible de juger avec quelle partie du fil on a fait le pointé.

En se reportant à ce que nous avons dit au sujet des observations d'ascension droite, on doit, pour le Soleil, observer le premier bord et le deuxième, le bord supérieur et le bord inférieur. Cette observation demande une certaine habileté lorsqu'on veut obtenir les passages à des fils symétriques. Nous indiquerons, comme exemple, la manière de procéder avec un micromètre à huit fils que nous numérotons de droite à gauche (fig. 86). Si l'observation doit se faire à l'œil et à l'oreille, on emploiera des fils distants de 15 secondes environ avec un intervalle de 30 secondes au méridien, et on fera usage de deux couples de fils horizontaux supplémentaires (un seul fil pourrait suffire) assez distants pour qu'on puisse pointer les deux bords en distance polaire sans trop tourner la vis du micromètre.

Ces fils sont portés par le même cadre que le fil mobile servant à l'observation des étoiles.

On devra connaître la distance de ces fils extrêmes au fil mobile milieu. On observera :

Le premier bord aux fils 2, 3, 4, 5, 6, 7;

Le bord supérieur au fil supplémentaire supérieur (3 pointés) en notant la seconde ronde;

Le deuxième bord aux fils 1, 2, 3;

Le bord inférieur au fil supplémentaire inférieur (3 pointés) en notant la seconde ronde;

Le deuxième bord aux fils 6, 7, 8.

Fig. 86.

Il faudra s'assurer que le fil moyen (2, 3, 4, 5, 6, 7) est le même que le fil moyen (1, 2, 3, 6, 7, 8) ou tenir compte de la différence. Si on ne tient pas à avoir des fils symétriques, l'opération devient très simple, mais la réduction fil à fil est moins rapide.

Si l'observation est enregistrée au chronographe, on emploiera des fils distants de 4 secondes environ avec le même intervalle au méridien que dans le cas précédent. On observera :

Le premier bord aux fils 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8;

Le bord supérieur au fil mobile ordinaire placé préalablement dans le voisinage du bord à pointer (3 pointés, 1 top à chaque pointé);

Le bord inférieur au même fil mobile qu'on a eu

soin de ramener rapidement vers le bas du champ (3 pointés, 1 top à chaque pointé) ;

Le deuxième bord aux fils 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.

Ces opérations doivent se faire assez vite, mais sans précipitation ; il faut surtout ne pas hésiter sur le sens dans lequel on doit agir sur les vis du réticule et de la plaque porte-oculaire. A Greenwich, l'observateur se fait aider par deux assistants.

Dans le cas de la Lune, où on n'observe qu'un bord en ascension droite et un en déclinaison, l'opération est plus simple ; il suffit de caler pour le centre. Pour le premier bord, on fera l'observation de passage, puis celle du bord supérieur ou du bord inférieur avec le fil extrême convenable. Pour le second bord, on commencera par l'observation de déclinaison. Mais on préfère souvent observer le bord en distance polaire au fil mobile milieu. Il n'y a de difficulté que pour le cas où le second bord doit être observé. On cale sur le bord éclairé (calage calculé) et on lit le cercle ; on fait ensuite sur le bord trois pointés voisins du méridien en notant les heures, on décale, on ramène le bord d'ascension droite à la hauteur du fil idéal et on observe le second bord à des fils symétriques. En pointant le cratère Mösting A, on opère comme si on observait une étoile.

En procédant comme nous venons de l'indiquer, on a l'avantage d'avoir des angles horaires très faibles, les observations de distance polaire se trouvant effectuées près du méridien.

75. **Détermination du bord observable de la Lune en déclinaison.** — Il suffit pour résoudre ce problème de chercher la position du Soleil par rapport

au plan passant par la ligne Est-Ouest et le centre de la Lune à l'époque du passage au méridien.

Soient PLE′ (fig. 87) le méridien, L′ la position apparente de la Lune (position vraie corrigée de la parallaxe de hauteur π, mais pas de la réfraction qu'on peut négliger dans le problème actuel), L′A l'intersection de la sphère céleste et du plan Est-Ouest-Lune, PS_1A le cercle horaire du Soleil, EE′ l'équateur. Le triangle sphérique AL′P, rectangle en L′, donne la relation :

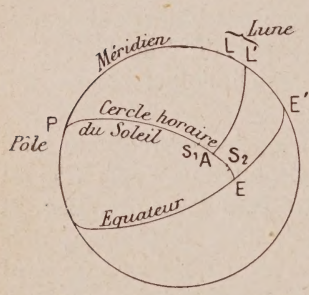


Fig. 87.

$$\text{tang PL}' = \text{tang PA} \cos \text{APL}'. \qquad (1)$$

Désignons par $\mathcal{AR}_\odot$, $\mathfrak{D}_\odot$, $\mathcal{AR}_\mathfrak{C}$, $\mathfrak{D}_\mathfrak{C}$ les coordonnées équatoriales du Soleil et de la Lune; on a :

$$\text{PL}' = 90^\circ - \mathfrak{D}_\mathfrak{C} + \pi,$$

$$\text{APL}' = \mathcal{AR}_\mathfrak{C} - \mathcal{AR}_\odot,$$

et appelons x l'arc EA, de sorte que $\text{PA} = 90^\circ - x$. La relation (1) s'écrit alors :

$$\cot(\mathfrak{D}_\mathfrak{C} - \pi) = \cot x \cos(\mathcal{AR}_\mathfrak{C} - \mathcal{AR}_\odot),$$

ou

$$\text{tang } x = \text{tang}(\mathfrak{D}_\mathfrak{C} - \pi) \cos(\mathcal{AR}_\mathfrak{C} - \mathcal{AR}_\odot).$$

Le Soleil S_1 sera au-dessus du plan AL′ et le bord observable sera le bord supérieur réel si

$$\text{ES}_1 > x \quad \text{ou} \quad \text{tang ES}_1 > \text{tang } x \quad (\text{ES}_1 = \mathfrak{D}_\odot),$$

c'est-à-dire :

$$\operatorname{tang} \mathfrak{D}_\odot > \operatorname{tang} (\mathfrak{D}_\mathbb{C} - \pi) \cos (\mathcal{R}_\mathbb{C} - \mathcal{R}_\odot). \quad (2)$$

Si au contraire le Soleil est en S_2, au-dessous du plan AL', le bord inférieur réel sera le mieux éclairé; mais on a alors :

$$ES_2 < x \quad \text{ou} \quad \operatorname{tang} ES_2 < \operatorname{tang} x \quad (ES_2 = \mathfrak{D}_\odot),$$

c'est-à-dire :

$$\operatorname{tang} \mathfrak{D}_\odot < \operatorname{tang} (\mathfrak{D}_\mathbb{C} - \pi) \cos (\mathcal{R}_\mathbb{C} - \mathcal{R}_\odot). \quad (3)$$

Les inégalités (2) et (3) permettent donc de décider quel est celui des deux bords qui est observable. Il ne faut pas oublier que la lunette méridienne renversant les images, on doit pointer le bord inférieur apparent quand le bord supérieur réel est bien éclairé et *vice versa*.

M. Hamy[1] a indiqué une manière très simple de résoudre géométriquement les inégalités

$$x > \mathfrak{D}_0 \quad \text{et} \quad x < \mathfrak{D}_0$$

qui servent à déterminer le bord observable en déclinaison. Cette solution consiste à construire la projection stéréographique du triangle APL sur le plan de l'équateur, le point de vue étant au pôle austral. On sait que dans la projection stéréographique les cercles sont représentés par des cercles; la projection du grand cercle AL est donc une circonférence. Les points P, S, A sont placés dans le même ordre sur la sphère et en projection; il sera donc facile de déterminer le bord bien éclairé. M. Hamy indique en outre comment on peut

[1] Hamy, 5, *Bull. astr.*, t. VII, p. 261.

tracer un diagramme dont l'emploi donne très rapidement la solution cherchée.

Dans les cas douteux, l'observation des bords en déclinaison ne présente pas de garantie de précision, et il est préférable de ne la pas faire.

76. **Correction de la phase**. — Lorsqu'on a observé le bord bien éclairé d'une planète ayant des phases, il suffit pour avoir la position du centre d'ajouter ou retrancher à la déclinaison du bord observé le demi-diamètre apparent fourni par les éphémérides. Dans quelques cas, ainsi que nous l'avons dit au § 56, l'aspect de l'objet ne permet de pointer que le centre, ou du moins ce que l'on juge être le centre de la tache blanchâtre observée.

Pour avoir les coordonnées du centre vrai, il y a lieu

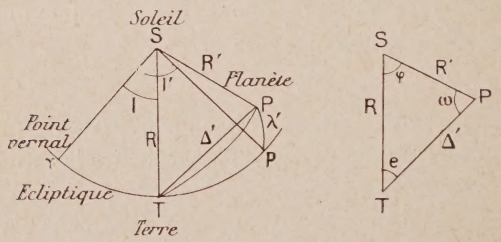


Fig. 88.

d'appliquer à l'ascension droite et à la déclinaison une correction. Plaçons le Soleil S (fig. 88) au centre de la sphère céleste et figurons l'écliptique γTp.

Soient :

l' la longitude héliocentrique γSp de la planète P,

l la longitude héliocentrique γST de la Terre T,

λ' la latitude héliocentrique Pp de la planète,

$\mathcal{A}_\odot$, $\mathcal{D}_\odot$ l'ascension droite et la déclinaison du Soleil,

$\mathcal{A}_p$, $\mathcal{D}_p$ l'ascension droite et la déclinaison de la planète,

R' le rayon vecteur SP de la planète,

R le rayon vecteur ST de la Terre,

Δ' la distance TP de la Terre à la planète,

d le demi-diamètre de la planète.

Figurons à part le triangle STP, les sommets S, T et P représentant les positions du Soleil, de la Terre et de la planète dans le plan passant par le centre de ces trois astres. Le triangle sphérique TPp rectangle en p donne la relation :

$$\cos \varphi = \cos (l' - l) \cos \lambda', \qquad (1)$$

en appelant φ l'angle TSP. Considérons le triangle rectiligne STP et désignons par ω l'angle SPT et par e l'angle STP; on a les relations :

$$\sin \omega = \frac{R}{\Delta'} \sin \varphi, \qquad (2)$$

$$\sin e = \frac{R'}{\Delta'} \sin \varphi. \qquad (3)$$

En valeur absolue on a :

$\omega \gtrless 90^\circ$, suivant que $R \cos \varphi \gtrless R'$, car $R \cos \varphi$ est la projection de R sur R';

$e \gtrless 90^\circ$, suivant que $R' \cos \varphi \gtrless R$, car $R' \cos \varphi$ est la projection de R' sur R.

On prendra toujours sin φ positivement.

Dans la figure 89, on a, en désignant par f la flèche $a\tau$ de la partie éclairée vue du centre de la Terre,

$$Pa \quad \text{ou} \quad d - f = d \cos \tau P \sigma' = - d \cos \omega,$$

puisque les angles TPσ' et cPb ont leurs côtés perpendiculaires et que cPb est le supplément de SPT ou ω. Donc

$$f = d\,(1 + \cos\omega) = 2d\cos^2\frac{\omega}{2},$$

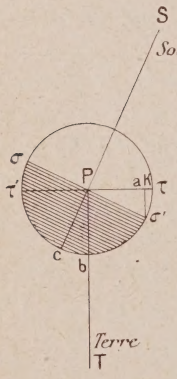


Fig. 89.

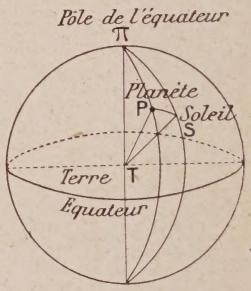


Fig. 90.

et la distance PK ou D du centre au milieu de la flèche sera :

$$D = d - \frac{1}{2}f = d\left(1 - \cos^2\frac{\omega}{2}\right) = d\sin^2\frac{\omega}{2}.$$

Considérons maintenant (fig. 90) le triangle sphérique πPS, π étant le pôle de l'équateur, P et S ont été définis plus haut. Il faut projeter D sur le plan perpendiculaire au méridien de la planète et passant à la fois par le centre de la Terre et par le centre de la planète (correction d'ascension droite), et sur le plan méridien de la planète (correction de distance polaire).

Désignons par χ l'angle dont l'arête est TP; nous aurons :

$$\frac{\sin\chi}{\sin\pi S} = \frac{\sin PT\pi S}{\sin PS};$$

ou

$$\frac{\sin\chi}{\cos\mathfrak{D}_\odot} = \frac{\sin(\mathcal{A}_p - \mathcal{A}_\odot)}{\sin e},$$

et en remplaçant sin e par la valeur (3),

$$\sin\chi = \frac{\Delta'}{R'}\,\frac{\sin(\mathcal{A}_p - \mathcal{A}_\odot)\cos\mathfrak{D}_\odot}{\sin\varphi}.$$

On aura finalement :

$$\delta\mathcal{A}_p = +\,D\sin\chi = d\sin^2\frac{\omega}{2}\sin\chi,$$

$$\delta\mathfrak{P}_p = +\,D\cos\chi = d\sin^2\frac{\omega}{2}\cos\chi.$$

$\delta\mathcal{A}_p$ a le signe de sin χ :

$-$ si le temps moyen de l'observation $> 12^h$,
$+$ si le temps moyen de l'observation $< 12^h$.

$\delta\mathfrak{P}_p$ a le signe de cos χ,

cos χ étant positif ou négatif, suivant que

$$\text{tang}\,\mathfrak{D}_\odot \gtrless \text{tang}\,\mathfrak{D}_p\cos(\mathcal{A}_p - \mathcal{A}_\odot).$$

Les formules (1) et (2) donneront φ et ω. Pour faciliter le calcul de χ, on construira une Table des valeurs de sin $(\mathcal{A}_p - \mathcal{A}_\odot)$ cos $\mathfrak{D}_\odot$ ayant pour argument horizontal $\mathfrak{D}_\odot$ (5^o en 5^o) de 0^o à 30^o et pour argument vertical $\mathcal{A}_p - \mathcal{A}_\odot$ (20^m en 20^m) de 0^h à 4^h. Ayant ω et χ, les produits $\sin^2\frac{\omega}{2}\sin\chi$ et $\sin^2\frac{\omega}{2}\cos\chi$ peuvent se

déduire d'une même Table ayant pour argument horizontal ω (10° en 10°) de 0° à 90° et pour argument vertical χ (10° en 10°) de 0° à 90° $\left(\text{calcul de } \sin^2\frac{\omega}{2} \sin\chi\right)$ ou de 90° à 0° $\left(\text{calcul de } \sin^2\frac{\omega}{2} \cos\chi\right)$, les arguments verticaux en regard ayant une somme égale à 90°.

77. **Réduction au méridien d'une observation de déclinaison faite hors du méridien.** — Soient (fig. 91) :

P le pôle boréal,

PD le méridien,

PE le cercle horaire de l'étoile E au moment du pointé,

DE le parallèle de l'étoile.

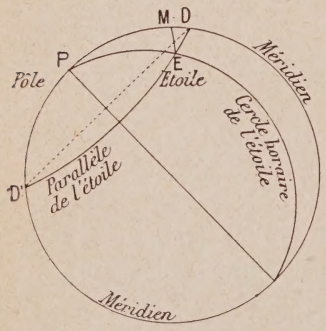


Fig. 91.

Menons par E un arc de grand cercle EM perpendiculaire au méridien. Dans la lunette, l'arc PM devient le fil idéal coïncidant avec le méridien, l'arc de grand cercle EM devient le fil mobile pointé sur l'astre E. La lecture faite lorsque l'étoile est en E donne une distance polaire PM qu'il y a lieu de corriger. En effet, si on avait attendu, pour pointer, le moment de la culmination, l'étoile eût été en D et la distance polaire aurait eu pour valeur PD. La distance MD s'appelle la *réduction au méridien;* nous la désignerons par R.

Cette quantité est évidemment fonction de la distance polaire et de l'angle horaire, ce dernier étant toujours petit lorsque les observations sont faites suivant les procédés que nous avons exposés.

Nous allons calculer la valeur de R. Soient $\mathcal{P}$ et $\mathcal{P}'$ les distances polaires PE (vraie) et PM (observée); on a :

$$\text{MD ou } R = \mathcal{P} - \mathcal{P}';$$

le triangle PME (fig. 92) donne la relation ;

$$\text{tang } \mathcal{P}' = \text{tang } \mathcal{P} \cos t, \qquad (1)$$

t désignant l'angle horaire MPE de l'étoile E. Connaissant $\mathcal{P}'$ et t, on calculera $\mathcal{P}$ avec (1) et ensuite R par une simple différence. Mais sous cette forme le calcul n'est pas très pratique. On écrit généralement la valeur de R de manière à l'obtenir directement de Tables faciles à construire et à employer. On la transforme pour cela comme il suit :

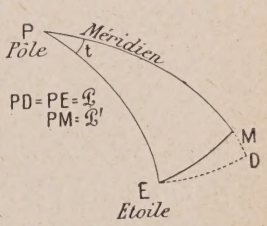


Fig. 92.

$$\text{tang } R = \text{tang } (\mathcal{P} - \mathcal{P}'),$$

$$= \frac{\text{tang } \mathcal{P} - \text{tang } \mathcal{P}'}{1 + \text{tang } \mathcal{P} \text{ tang } \mathcal{P}'},$$

$$= \frac{\text{tang } \mathcal{P} - \text{tang } \mathcal{P} \cos t}{1 + \text{tang } \mathcal{P} \text{ tang } \mathcal{P} \cos t},$$

$$= \frac{\text{tang } \mathcal{P} (1 - \cos t)}{1 + \text{tang}^2 \mathcal{P} \cos t},$$

$$= \frac{2 \operatorname{tang} \mathfrak{P} \sin^2 \frac{1}{2} t}{1 + \operatorname{tang}^2 \mathfrak{P} \cos t},$$

$$= \frac{2 \sin \mathfrak{P} \cos \mathfrak{P} \sin^2 \frac{1}{2} t}{\cos^2 \mathfrak{P} + \sin^2 \mathfrak{P} \cos t},$$

$$= \frac{\sin 2\mathfrak{P} \sin^2 \frac{1}{2} t}{\cos^2 \mathfrak{P} \left(\cos^2 \frac{1}{2} t + \sin^2 \frac{1}{2} t \right) + \sin^2 \mathfrak{P} \left(\cos^2 \frac{1}{2} t - \sin^2 \frac{1}{2} t \right)},$$

$$= \frac{\sin 2\mathfrak{P} \sin^2 \frac{1}{2} t}{\cos^2 \frac{1}{2} t + \sin^2 \frac{1}{2} t \,.\, \cos 2\mathfrak{P}},$$

$$= \frac{\sin 2\mathfrak{P} \operatorname{tang}^2 \frac{1}{2} t}{1 + \operatorname{tang}^2 \frac{1}{2} t \cos 2\mathfrak{P}};$$

ou, en introduisant la déclinaison $\mathfrak{D} = 90^\circ - \mathfrak{P}$,

$$\operatorname{tang} R = \frac{\sin 2\mathfrak{D} \operatorname{tang}^2 \frac{1}{2} t}{1 - \operatorname{tang}^2 \frac{1}{2} t \,.\, \cos 2\mathfrak{D}}.$$

Posons $\frac{1}{2} t = \tau$; alors

$$\operatorname{tang} R = \frac{\sin 2\mathfrak{D} \operatorname{tang}^2 \tau}{1 - \operatorname{tang}^2 \tau \cos 2\mathfrak{D}}.$$

Les quantités R et τ sont petites; nous développerons les tangentes suivant la formule connue

$$\operatorname{tang} \varepsilon = \varepsilon + \frac{\varepsilon^3}{3} + \frac{2\varepsilon^5}{15} + \dots$$

En négligeant le cube de R et la cinquième puissance de τ, on aura alors :

$$\text{tang } R = R.$$

$$\text{tang } \tau = \tau + \frac{\tau^3}{3}, \qquad \text{tang}^2 \tau = \tau^2 + \frac{2\tau^4}{3};$$

d'autre part, au même degré d'approximation,

$$\frac{1}{1 - \text{tang}^2 \tau \cos 2(D)} = 1 + \text{tang}^2 \tau \cos 2(D),$$

$$= 1 + \tau^2 \cos 2(D) + \frac{2\tau^4}{3} \cos 2(D);$$

donc, abstraction faite du signe de R que nous déterminerons plus loin,

$$R = \sin 2(D) \left(\tau^2 + \frac{2\tau^4}{3}\right)(1 + \tau^2 \cos 2(D)),$$

en négligeant le terme en τ^4 dans le dernier facteur, le second contenant τ^2 en facteur. Effectuons le produit des parenthèses en supprimant le terme en τ^6; on a :

$$R = \tau^2 \sin 2(D) + \frac{2\tau^4}{3} \sin 2(D) + \tau^4 \sin 2(D) \cos 2(D),$$

$$= \tau^2 \sin 2(D) + \sin 2(D) \cdot \tau^4 \left(\frac{2}{3} + \cos 2(D)\right),$$

$$= \tau^2 \sin 2(D) + 2\tau^4 \sin 2(D) \left(\cos^2 (D) - \frac{1}{6}\right).$$

Introduisons de nouveau t au lieu de τ; il vient :

$$R = \frac{t^2}{4} \sin 2(D) + \frac{t^4}{8} \sin 2(D) \left(\cos^2 (D) - \frac{1}{6}\right).$$

L'angle t est généralement exprimé en minutes de temps et fractions décimales de la minute; sa valeur

en secondes d'arc est : $t \times 60 \times 15 \sin 1''$; on a alors :

$$R \sin 1'' = 60^2 \frac{15^2}{4} \sin^2 1'' \sin 2\text{Ⓓ} \cdot t^2$$

$$+ 60^4 \cdot \frac{15^4}{8} \sin^4 1'' \cdot \sin 2\text{Ⓓ} \left(\cos^2 \text{Ⓓ} - \frac{1}{6} \right) t^4,$$

et finalement :

$$R = \frac{900^2}{4} \sin 1'' \sin 2\text{Ⓓ} \cdot t^2$$

$$+ \frac{900^4}{8} \sin^3 1'' \cdot \sin 2\text{Ⓓ} \left(\cos^2 \text{Ⓓ} - \frac{1}{6} \right) t^4.$$

Le second terme de cette expression est presque toujours négligeable. Pour la Polaire ($\text{Ⓓ} = 88°50'$), il ne devient sensible que pour les valeurs de t supérieures à 25 minutes. Si nous posons :

$$A = \frac{900^2}{4} \sin 1'' t^2, \qquad B = \sin 2\text{Ⓓ},$$

nous aurons, en conservant seulement le premier terme de l'expression ci-dessus :

$$R_1 = A \cdot B.$$

On peut obtenir cette formule[1] en effectuant les développements différemment. La formule (1) peut s'écrire :

$$\text{tang Ⓓ} = \text{tang Ⓓ}' \cos t,$$

ou

$$\text{tang Ⓓ}' = \text{tang Ⓓ} \sec t ;$$

[1] Brunnow, *Traité d'astronomie* (édition française, *Astronomie pratique*), p. 235.

mais en appelant — R la réduction à appliquer à la déclinaison, on a : $\mathfrak{D}' = \mathfrak{D} - R$, et

$$\operatorname{tang}(\mathfrak{D} - R) = \operatorname{tang}\mathfrak{D}\ \operatorname{séc} t.$$

La formule de Taylor :

$$f(x+h) = f(x) + hf'(x) + \frac{h^2}{1\cdot 2}f''(x) + \ldots,$$

donne :

$$\operatorname{tang}(\mathfrak{D} - R) = \operatorname{tang}\mathfrak{D} - R\frac{1}{\cos^2\mathfrak{D}} + R^2\frac{\sin\mathfrak{D}}{\cos^3\mathfrak{D}} + \ldots;$$

mais, d'autre part, en développant séc t,

$$\operatorname{tang}(\mathfrak{D} - R) = \operatorname{tang}\mathfrak{D}\left(1 + \frac{t^2}{2} + \frac{5t^4}{24} + \ldots\right).$$

En égalant les seconds membres, il vient, en négligeant les termes en R^2 et en t^4 :

$$-R\frac{1}{\cos^2\mathfrak{D}} = \frac{t^2}{2}\operatorname{tang}\mathfrak{D},$$

ce qui donne comme première approximation :

$$R = -\frac{t^2}{2}\sin\mathfrak{D}\cos\mathfrak{D}$$

$$= -\frac{t^2}{4}\sin 2\mathfrak{D}.$$

Reprenons l'égalité formée en prenant les deux valeurs de tang $(\mathfrak{D} - R)$ et conservons les termes en R^2 et en t^4 ; il vient :

$$-R\frac{1}{\cos^2\mathfrak{D}} + R^2\frac{\sin\mathfrak{D}}{\cos^3\mathfrak{D}} = \frac{t^2}{2}\operatorname{tang}\mathfrak{D} + \frac{5t^4}{24}\operatorname{tang}\mathfrak{D},$$

ou en y remplaçant R^2 par la valeur trouvée en première approximation :

$$-R\frac{1}{\cos^2 \mathfrak{D}}+\frac{t^4}{4}\frac{\sin^3 \mathfrak{D}}{\cos \mathfrak{D}}=\frac{t^2}{2}\frac{\sin \mathfrak{D}}{\cos \mathfrak{D}}+\frac{5t^4}{24}\frac{\sin \mathfrak{D}}{\cos \mathfrak{D}},$$

ou :

$$-R=\frac{t^2}{4}\sin 2\mathfrak{D}-\frac{t^4}{8}\sin 2\mathfrak{D}\left(\sin^2 \mathfrak{D}-\frac{5}{6}\right)$$

$$=\frac{t^2}{4}\sin 2\mathfrak{D}+\frac{t^4}{8}\sin 2\mathfrak{D}\left(\cos^2 \mathfrak{D}-\frac{1}{6}\right);$$

c'est la formule trouvée plus haut.

Les quantités A et B sont faciles à réduire en Tables.

La première donne les valeurs de A pour des valeurs de t de dixième en dixième de minute de temps jusqu'à 10 minutes. Les différences permettent d'interpoler par parties proportionnelles. Si l'on veut avoir la valeur de A pour un temps t supérieur à 10 minutes, on prendra la valeur correspondant au temps $\frac{t}{10}$ et on la multipliera par 100. L'approximation est suffisante, parce que t ne peut acquérir une valeur supérieure à 10 minutes que si l'astre est voisin du pôle, auquel cas le facteur B est très petit, $2\mathfrak{D}$ étant peu différent de 180°.

La Table donnant les valeurs de B a pour argument la déclinaison ou la distance polaire, de 10′ en 10′ jusqu'à 15°, de degré en degré de 15° jusqu'à 45° limite de la Table. Si $\mathfrak{P}$ dépasse 90°, on entrera dans la Table avec l'argument $\mathfrak{P}-90°$, les angles $2\mathfrak{P}$ et $2\mathfrak{P}-180°$

ayant, au signe près, le même sinus. On a d'ailleurs pour les signes :

$$B > 0 \quad \text{si } \mathfrak{D} \text{ est positif ou } \mathfrak{P} < 90^\circ,$$
$$B < 0 \quad \text{si } \mathfrak{D} \text{ est négatif ou } \mathfrak{P} > 90^\circ.$$

Si l'on a :

$A < 100''$, il suffit de 3 chiffres décimaux dans B,

$A < 10''$, — 2 — —

$A < 1''$, — 1 — —

L'interpolation des valeurs de B se fait aisément par parties proportionnelles ; on inscrit en regard des valeurs de B les variations pour $10'$. Les valeurs de B seront calculées avec quatre décimales jusqu'à $\mathfrak{D} = 15^\circ$, trois décimales de $\mathfrak{D} = 15^\circ$ à $\mathfrak{D} = 26^\circ$, deux décimales ensuite.

Le terme en t^4, à savoir :

$$R_2 = \frac{900^4}{8} \sin^3 1'' \cdot \sin 2\mathfrak{D} \left(\cos^2 \mathfrak{D} - \frac{1}{6} \right) t^4,$$

ne devient sensible ($0'',01$) que pour des astres très voisins du pôle et observés très loin du méridien (20 minutes au moins).

Pour la Polaire il n'atteint la valeur $0'',05$ que pour un angle horaire de 30 minutes environ. Le terme R_2 est fonction de t et de $\mathfrak{D}$. On construira, pour le calculer rapidement, une Table ayant pour argument vertical des valeurs équidistantes de l'angle horaire (10 minutes en 10 minutes) jusqu'à 100 minutes, et pour argument horizontal les distances polaires de degré en degré depuis 0° jusqu'à 6°. Les valeurs de R_2 seront calculées à deux décimales.

Nous avons déterminé la valeur de R en supposant le fil servant aux pointés placé horizontalement. Il n'en est généralement pas ainsi; mais dans les instruments bien réglés l'inclinaison est extrêmement petite, et l'influence sur la valeur de R est négligeable. Il en est de même de la déviation de l'axe instrumental. Yvon Villarceau[1] a donné une discussion complète de cette question. On pourra consulter aussi sur ce sujet le Traité d'astronomie de Brünnow[2].

On remarquera qu'à l'équateur la réduction au méridien est nulle quel que soit l'angle horaire, le parallèle décrit par l'étoile étant l'équateur même. Cela résulte aussi de la formule, $\sin 2(\Theta$ étant alors nul. Il en serait de même si l'étoile était rigoureusement au pôle. Pour un angle horaire donné t, le maximum de la réduction au méridien correspond aux astres situés sur le cercle parallèle de 45°. Enfin cette correction R est d'ordre géométrique; nous entendons par là qu'elle ne dépend que de la position de l'astre par rapport au méridien; elle est indépendante de l'orientation de l'axe de la lunette et des fils du micromètre si celle-ci reste dans les limites voulues.

Il est facile de déterminer par une construction graphique[3] très simple la position de M par rapport à D, c'est-à-dire le signe de la correction R à appliquer à la lecture suivant le sens de la graduation du cercle. On voit *à priori* et par raison de symétrie que le signe

[1] Yvon Villarceau, **2**, *Annales de l'Observatoire de Paris* (Observations), t. XII, p. 82.

[2] Brünnow, *Traité d'astronomie* (astr. pratique, édition française, par C. André), p. 229.

[3] Périgaud, **3**, *Annales de l'Observatoire de Paris* (Observations de 1887), p. G. 25.

de R est indépendant du signe de l'angle horaire; cela résulte aussi de la valeur de R qui ne contient le facteur t qu'à la deuxième puissance. Considérons (fig. 91) le diamètre passant par M; le point e (fig. 93) où il coupe le diamètre DD′ est la projection de E sur le plan méridien, car le plan de l'arc de grand cercle EM est perpendiculaire au méridien, de même que le parallèle DED′ décrit par l'étoile. D'où la construction graphique suivante : tracer (fig. 93) le cercle PDP′D′ figurant le méridien, le diamètre DD′ intersection du parallèle et du méridien, prendre un point e très voisin de D et joindre Oe; le point M où cette ligne coupe le méridien indique la position relative de M par rapport à D. Supposons que les divisions du cercle aillent en croissant lorsque la lunette va du pôle boréal vers le Sud; dans le cas d'une étoile D de déclinaison boréale (passage supérieur), il faudra augmenter la lecture pour passer de M en D; donc $R > o$. Pour la même étoile en D′ (passage inférieur), il faudra diminuer la lecture afin de revenir de μ' en D′. Si l'étoile δ est de déclinaison australe, il faudra retrancher R pour obtenir la lecture correspondant au passage au méridien. La formule, en effet, donne des valeurs de R de signe contraire quand on y fait $\mathfrak{D}$ positif ou négatif ($\sin -2\mathfrak{D} = -\sin 2\mathfrak{D}$). Les conclusions sont à changer lorsque les divisions du cercle vont en croissant du Sud vers le pôle boréal.

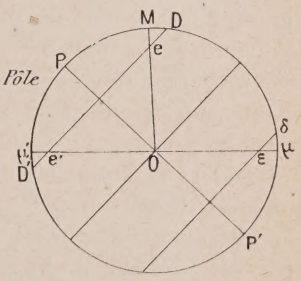


Fig. 93.

Pour les étoiles observées par réflexion, R change de signe.

Pour augmenter le nombre des pointés sans les faire trop précipitamment, on observe quelquefois entre chacun des fils d'ascension droite, comme l'indique les ⋆ de la figure 94. Il n'est pas nécessaire alors de noter les heures des pointés, à la condition que les distances

Fig. 94.

entre le premier et le dernier pointé et la distance polaire de l'étoile restent comprises entre certaines limites. Si l'angle horaire correspondant au premier et au dernier pointé n'excède pas 40 secondes, on peut admettre sans erreur sensible que la réduction au méridien est constante pour une distance polaire donnée (entre 116° et 45°) et l'on peut construire une Table des valeurs de R de degré en degré (argument $\mathfrak{P}$). Au delà de 45°, ce procédé serait insuffisant : il faudrait pointer plus près du méridien et noter les heures. La lenteur du mouvement de l'étoile permet d'ailleurs d'effectuer le même nombre de pointés.

Lorsqu'on a fait une série de pointés sur un astre

en dehors du méridien, on doit, en principe, corriger chaque pointé de la réduction au méridien. On fait en sorte le plus souvent que les pointés soient équidistants. Lorsque cette condition est réalisée, au moins très approximativement, on peut calculer rigoureusement la réduction au méridien dans le cas d'un nombre quelconque n de pointés, en effectuant cette réduction pour l'angle horaire moyen t_m et pour un angle horaire t_i égal à l'intervalle de temps compris entre les deux pointés extrêmes, et en faisant la somme des deux résultats après avoir multiplié le second par un facteur

$$f = \frac{1}{12} \cdot \frac{n+1}{n-1}.$$

Pour le démontrer, appelons τ l'intervalle de deux pointés successifs. Nous considérerons deux cas :

1° Le nombre n est impair et égal à $2\nu+1$; alors $t_i = 2\nu\tau$. Les angles horaires correspondant aux pointés successifs sont :

$$\begin{aligned}
t_{-\nu} &= t_m - \nu\tau, \\
&\dots\dots\dots, \\
t_{-2} &= t_m - 2\tau, \\
t_{-1} &= t_m - \tau, \\
t_0 &= t_m, \\
t_{+1} &= t_m + \tau, \\
t_{+2} &= t_m + 2\tau, \\
&\dots\dots\dots \\
t_{+\nu} &= t_m + \nu\tau,
\end{aligned}$$

et l'on a :

$$\frac{\Sigma t_j^2}{n} = t_m^2 + 2\,\frac{1^2+2^2+\dots+\nu^2}{n}\,\tau^2,$$

la somme des doubles produits étant nulle comme il est facile de le voir. Or la somme des carrés des p premiers nombres entiers est :

$$\sum_{x=1}^{x=p} x^2 = \frac{p\,(p+1)\,(2p+1)}{6} \qquad (x \text{ entier});$$

donc

$$\frac{\Sigma t_j^2}{n} = t_m^2 + \frac{1}{3}\,\nu\,(\nu+1)\,\tau^2,$$

puisque $n = 2\nu + 1$.

De $t_i = 2\nu\tau$ on déduit :

$$\tau = \frac{t_i}{2\nu}, \quad \tau^2 = \frac{t_i^2}{4\nu^2},$$

et alors

$$\frac{\Sigma t_j^2}{n} = t_m^2 + \frac{1}{12}\,\frac{\nu+1}{\nu}\,t_i^2;$$

puis en remarquant que

$$\nu + 1 = \frac{n+1}{2}, \quad \nu = \frac{n-1}{2}; \quad (n = 2\nu+1),$$

$$\frac{\Sigma t_j^2}{n} = t_m^2 + \frac{1}{12}\,\frac{n+1}{n-1}\,t_i^2. \qquad (1)$$

2° Le nombre n est pair et égal à 2ν ; alors

$$t_i = (2\nu - 1)\,\tau.$$

Les angles horaires correspondant aux pointés successifs sont :

$$t_{-\nu} = t_m - \frac{2\nu - 1}{2}\,\tau,$$

. . . . . .

$$t_{-2} = t_m - \frac{3}{2}\tau,$$

$$t_{-1} = t_m - \frac{1}{2}\tau,$$

$$t_{+1} = t_m + \frac{1}{2}\tau,$$

$$t_{+2} = t_m + \frac{3}{2}\tau,$$

. . . . . .

$$t_{+\nu} = t_m + \frac{2\nu - 1}{2}\tau,$$

et l'on a :

$$\frac{\Sigma t_j^2}{n} = t_m^2 + 2\,\frac{1^2+3^2+\ldots+(2\nu-1)^2}{4n}\,\tau^2.$$

Or la somme des carrés des p premiers nombres impairs est :

$$\sum_{x=1}^{x=2p-1} x^2 = \frac{p\,(2p+1)\,(2p-1)}{3} \qquad (x \text{ entier impair});$$

d'où, en observant que $n = 2\nu$,

$$\frac{\Sigma t_j^2}{n} = t_m^2 + \frac{1}{12}\,(2\nu+1)\,(2\nu-1)\,\tau^2;$$

mais

$$\tau^2 = \frac{t_i^2}{(2\nu-1)^2}, \quad n+1 = 2\nu+1, \quad n-1 = 2\nu-1;$$

on a définitivement :

$$\frac{\Sigma t_j^2}{n} = t_m^2 + \frac{1}{12}\,\frac{n+1}{n-1}\,t_i^2, \qquad (2)$$

formule identique à la formule (1).

La valeur de A peut donc s'écrire :

$$A = \frac{900^2}{4} \sin 1'' \left(t_m^2 + \frac{1}{12} \frac{n+1}{n-1} t_i^2 \right);$$

on calculerait cette valeur en entrant dans la Table avec un angle horaire égal à la racine carrée de la parenthèse ; mais il sera plus simple de faire le calcul en deux fois :

$$A_1 = \frac{900^2}{4} \sin 1'' \, t_m^2,$$

$$A_2 = \frac{900^2}{4} \sin 1'' \, . \, t_i^2;$$

une Table spéciale donnera les valeurs de

$$f = \frac{1}{12} \frac{n+1}{n-1} \text{ (de } n = 1 \text{ à } n = 25);$$

on calculera A_1 avec l'angle horaire t_m, A_2 avec l'angle horaire t_i, et l'on aura :

$$R = A_1 \, . \, B + f \, . \, A_2 \, . \, B = (A_1 + f \, . \, A_2) \, B.$$

Prenons, par exemple, une étoile ($\delta = 45°$) sur laquelle on aurait fait dix pointés auxquels correspondraient les angles horaires :

$$-1^m,60 \; -1^m,40 \; -1^m,20 \ldots -0^m,20 \; -0^m,00 \; +0^m,20,$$

d'où

$$t_m = -0^m,70 \qquad \text{et} \qquad t_i = 1^m,80.$$

Le procédé ordinaire donne :

$$R = \frac{1}{10} 1,00 \, (2,51 + 1,92 + 1,40 + \ldots + 0,00 + 0,04) = +0'',80,$$

et la méthode que nous venons d'exposer :

$$R_1 = A_1 . B = +0'',48, \qquad R_2 = f . A_2 . B = +0'',32$$

et

$$R = +0'',80.$$

Cet ingénieux procédé de réduction a été indiqué par M. Gaillot.

78. **Correction provenant de l'inclinaison du fil dans le cas des observations faites hors du méridien.** — Nous avons supposé jusqu'ici le fil servant à effectuer les pointés rigoureusement horizontal : c'est là une condition qui ne peut être remplie qu'accidentellement. De même que dans le calcul de la réduction au méridien nous n'avons pas tenu compte de l'inclinaison du fil, de même dans la solution du problème qui nous occupe nous négligerons la réduction au méridien, ce qui revient en somme à négliger des quantités du deuxième ordre, celles du premier étant déjà très petites dans un instrument bien établi; en d'autres termes, nous confondons le parallèle décrit par l'étoile avec un grand cercle perpendiculaire au méridien, ce qui aurait réellement lieu si l'on observait à l'équateur. Nous supposerons aussi que l'axe optique décrit exactement le méridien et que le plan du réticule est perpendiculaire à l'axe optique, condition réalisée, dans les instruments bien construits, avec assez d'exactitude pour qu'il n'en résulte aucun effet sensible. La discussion que nous avons rappelée au paragraphe précédent a montré que le défaut d'orientation est sans influence sensible lorsqu'il ne dépasse pas certaines limites qui ne sont jamais atteintes dans les instruments

bien réglés. Il est bon de noter que le défaut d'orientation aurait plus d'influence sur la correction d'inclinaison que sur la réduction au méridien.

Au point de vue de la précision des pointés, il est urgent que l'inclinaison soit très faible. L'observateur, en effet, s'efforce de placer le fil sur l'étoile et s'assure aussi rapidement que possible que la coïncidence est bien établie. Si le fil avait une forte inclinaison, l'étoile s'en échapperait en quelque sorte sans que l'observateur ait pu contrôler l'exactitude de son pointé.

Soient (fig. 95) *pmp'* la trace du méridien sur le

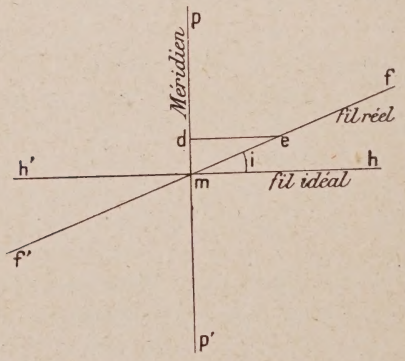


Fig. 95.

plan du réticule, *fmf'* le fil mobile réel faisant avec le fil horizontal idéal *hmh'* un angle *i*. Supposons toutes les observations rapportées à ce fil idéal, c'est-à-dire, les observations étant faites au méridien, les astres pointés en *m*. Si un astre E a été observé en *e* hors du méridien avec le fil réel *ff'*, il y aura lieu de corriger la lecture faite de la distance *md*, l'étoile étant

sur l'horizontale *ed* alors qu'elle aurait dû se trouver sur *hh'*. Cette correction s'appelle la *correction d'inclinaison*. Nous allons la calculer. Nous supposerons connue l'inclinaison *i* du fil réel et du fil idéal; nous indiquerons au livre III comment on la détermine pratiquement.

Soient (fig. 96) P le pôle boréal, PMP' le méridien,

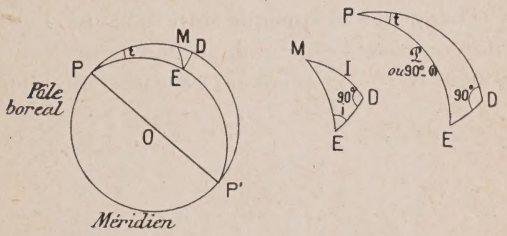


Fig. 96.

PEP' le cercle horaire de l'étoile E au moment du pointé, ED un arc de grand cercle perpendiculaire au méridien. L'angle *dem* (fig. 95) peut être considéré comme mesurant l'angle du plan passant par le centre optique O et *em* avec le plan passant par O et *ed*. La plan passant par O et *ed* se traduit sur la sphère céleste par l'arc de grand cercle ED; celui qui passe par O et *em* se traduit par EM. L'angle MED est donc sensiblement égal à *i*, et l'arc MD est la correction cherchée I. Dans le triangle EMD on a :

$$\text{tang I} = \text{tang } i \sin \text{DE},$$

et dans le triangle DEP :

$$\sin \text{DE} = \sin t \cos \Phi;$$

par suite,

$$\text{tang I} = \text{tang } i \cos \text{Ø} \sin t,$$

ou, comme I et t sont de petites quantités :

$$\text{I} = t \,.\, \text{tang } i \cos \text{Ø},$$

et, en secondes d'arc :

$$\text{I} = t \,.\, 900'' \,\text{tang } i \cos \text{Ø}.$$

Pour faciliter le calcul de cette quantité, on la réduit en Table. Posons :

$\text{C} = 900''$ tang $10'$ cos Ø (valeur de I pour $i = 10'$, $t = 1$),

$$\text{T} = t \times \frac{\text{tang } i}{\text{tang } 10'} = t \times \frac{i}{10}.$$

On a :

$$\text{I} = \text{C} \,.\, \text{T}.$$

On calculera les valeurs de C à 4 décimales de $10'$ en $10'$ depuis $\text{Ø} = 90°$ jusqu'à $\text{Ø} = 84°10'$; puis à 3 décimales de degré en degré, depuis $\text{Ø} = 84°$ jusqu'à $\text{Ø} = 0°$. Si la déclinaison est négative, on entre dans la Table avec l'argument $90° + \text{Ø}$.

La formule qui précède peut être appliquée jusqu'à $i = 30'$; or nous avons dit qu'on ne doit jamais laisser l'inclinaison i dépasser $2'$ ou $3'$.

Pour fixer le signe de la correction, il suffit de se rendre compte, à l'examen de la figure du réticule, de la façon dont on doit déplacer la lunette pour passer de la position où on a observé à celle qu'elle aurait dû avoir si le fil réel n'avait pas fait avec le fil idéal l'angle i.

Afin d'éviter toute ambiguïté, on convient de donner à i le signe + quand la partie Ouest du fil réel est au-

dessus du fil idéal horizontal et la partie Est conséquemment au-dessous, la lunette étant pointée sur l'horizon Sud.

Comme on a, dans la pratique des observations méridiennes, à appliquer fréquemment les corrections R et I, il faut pouvoir leur donner le signe voulu sans être astreint à renouveler les raisonnements exposés. On le fera aisément à l'aide du Tableau suivant dans lequel nous donnons aux lettres le sens qu'elles ont dans les paragraphes précédents.

Les lectures sous l'index croissent quand la lunette va

Distance polaire de l'astre.	DU PÔLE BORÉAL VERS LE SUD (PÔLE-ZÉNITH-SUD)			DU SUD VERS LE PÔLE BORÉAL (SUD-ZÉNITH-PÔLE)		
	R	I		R	I	
		i et t, même signe.	i et t, signes contraires.		i et t, même signe.	i et t, signes contraires.
$\mathcal{D} < 90°$ PS.	+	−	+	−	+	−
$\mathcal{D} < 90°$ PI.	−	+	−	+	−	+
$\mathcal{D} > 90°$ . . .	−	−	+	+	+	−

Pour les étoiles observées par réflexion, R change de signe, I n'en change pas.

TABLE ALPHABÉTIQUE DES AUTEURS ET DES MATIÈRES

Abbadie (d'), 149.
Aberration chromatique, 37.
Aberration de réfrangibilité, 37.
Aberration de sphéricité, 38.
Aberration zonale, 39.
Aération, 260.
Airy, 32, 103, 161.
Albrecht, 141, 152.
Almicantarat, 14.
Anding, 74.
Angle horaire, 18.
Arago, 46.
Argelander, 152.
Arsonval (d'), 88.
Ascension droite, 7, 10.
Astres (observation des), 169, 270.
Astres (mouvement apparent), 1, 25.
Aubert, 250.
Auzout, 48.
Axe de rotation, 56.
Axe du monde, 3, 7.
Azimut, 16.

Baillaud, 38, 221.
Bain de mercure, 231, 239, 247, 253.
Bakhuyzen (van de Sande), 75, 82, 263.
Ball (de), 107.
Bandes (relevé des), 105.
Baromètre (lecture du), 265.
Becker, 59, 141, 222.
Berthoud, 87.
Besicles, 167.
Bessel, 152, 189, 223, 262.
Bigourdan, 150, 166, 247, 248, 249, 250.
Blinn, 90.
Boë (de), 238.
Bohnenberger, 73.
Bond, 102.
Boquet, 82, 90, 107, 113, 114, 139, 246, 248.
Boss, 210, 211, 212.
Boys, 55.
Bradley, 74, 169.
Brashear, 55.
Braun, 140.
Bréguet, 88.
Brillouin, 100.
Brooks, 90.
Bruck, 114, 164, 222.
Brunner, 158.
Brunnow, 102, 163, 288, 292.
Buckney, 75.
Burnham, 55.
Buschbaum, 200.

Callandreau, 46.
Campos Rodrigues, 244.
Caspari, 94.
Cassini, 25.
Centrage (faux), 37.
Ceraski, 46.
Cercle de calage, 206.
Cercle de déclinaison, 8.

Cercle de lecture, 209.
Cercle de Ramsden, 43.
Cercle horaire, 8.
Cercle horizontal, 14.
Cercle méridien, 32, 205.
Cercle mural, 31.
Chatelu, 70, 90, 113, 139, 252.
Chauvenet, 85, 90, 102.
Christie, 153, 226, 227, 263.
Chronographes, 102.
Chronographes à bande, 104.
Chronographes à cylindre, 103.
Chronographes imprimants, 107, 109, 112, 114.
Chronomètres, 94.
Ciel, 1.
Cohn, 142.
Colatitude, 24.
Collimateurs horizontaux, 161.
Collimateur zénithal, 166, 257.
Common, 57, 59.
Comstock, 75, 148, 164.
Cooke, 40.
Coordonnées, 5, 7, 13, 17.
Coordonnées équatoriales, 18.
Coordonnées géographiques, 22.
Coordonnées horaires, 18.
Coordonnées (relations entre), 20.
Coordonnées uranographiques, 18.
Copeland, 36, 211, 238, 251, 262.
Copernic, 2.
Cornu, 94, 158, 263.
Culmination, 17.

Davis, 63, 79.
Déclinaison, 9.
Deichmüller, 259.
Delporte, 74, 77, 87.
Dent, 81, 83.
Distance des fils, 186.
Distance polaire, 8.
Distance zénithale, 14.
Doberck, 81, 83.
Dynamètre de Ramsden, 45.

Ébert, 70, 251, 256, 257, 260.
Échappement, 72, 73.
Éclairage, 64.
Écliptique, 11.
Écran solaire, 167.
Eichens, 206.
Ellery, 152, 241.
Ellis, 62.
Encke, 216.
Équateur, 5.
Équateur terrestre, 23.
Équinoxe de printemps, 10.
Est, 14.
Étoile, 1.
Étoile circompolaire, 4.
Étoile fondamentale, 12.
Étoile polaire, 4.

Farman, 40.
Faye, 166, 233, 261.
Fayet, 145.
Fénon, 72, 73, 83, 85, 93, 99.
Fil (correction de l'inclinaison du), 299.
Fil d'ascension droite, 49.
Fil de déclinaison, 50.
Fil horaire, 48.
Fil milieu, 175.
Fil moyen, 175.
Fil moyen (réduction au), 182, 184, 187, 191.
Finlay, 152.
Flint, 141.
Fœrster, 80, 148.
Foucault (L.), 85, 94.
Franz, 199, 200.

Gaillot, 299.
Galilée, 2, 46.

Gambey, 31, 211, 212, 213, 239.
Gautier (P.), 38, 44, 50, 103, 114, 138, 142, 206, 212, 240.
Gill, 210, 212, 227.
Gnomon, 31.
Gonnessiat, 145, 188, 263.
Graham, 73, 74, 75, 81.
Grossissement, 45.
Grossmann, 200.
Gruey, 44, 149, 227.
Guénaire, 88, 100.
Guillaume (Ed.), 76.

Hall, 149.
Hamy, 100, 245, 263, 264, 279.
Harrisson, 75.
Hartwig, 203.
Hauteur, 15.
Hémisphère austral, 5.
Hémisphère boréal, 5.
Henry (Frères), 163.
Heure sidérale, 20.
Hilfiker, 81.
Hipp, 79, 81, 82, 97.
Hirsch, 62, 79, 81.
Hohwü, 73, 80.
Holden, 54, 59, 81, 210, 257.
Horizon, 1.
Horizon artificiel, 229.
Horizon astronomique, 13.
Horizontal (plan), 13.
Horloge sidérale, 71.
Hossard, 231, 233.
Hough, 63, 64, 103, 109.
Howard, 79.
Howe, 55, 80.
Hutchins, 55.
Huyghens, 42, 48.

Instrument des passages, 33.

Jabely, 158, 244.
Joseph (Ch.), 72, 73.
Jour sidéral, 5.

Kelvin, 85.
Képler, 6.
Konkoly (de), 250.
Krueger, 218.
Küstner, 80, 242.

Lagarde, 170, 190.
Lalande, 50.
Langley, 204.
Lancelin, 70, 145, 246, 252.
Latitude céleste, 12.
Latitude géographique, 23.
Latitude terrestre, 22.
Lecture des microscopes, 224.
Lecture par tours négatifs, 226.
Lecture par tours positifs, 225.
Leitzmann, 262.
Le Paige, 234, 238, 239.
Leroy, 75.
Le Verrier, 32, 57, 60, 83, 102, 140, 153, 203, 206, 235, 261, 274.
Lippmann, 76, 84, 85, 162, 260.
Loewy, 157, 212, 226, 259.
Longitude céleste, 12.
Longitude géographique, 23.
Longitude terrestre, 22.
Lune (bord observable de la), 277.
Lunette des passages, 31.
Lunette méridienne, 31, 33.
Lunette réversible, 161.
Lunette non réversible, 161.

Malvasia, 48.
Marcuse, 244.
Martin, 75.
Mascart, 76, 88.
Mauvais, 239
Mayer, 50.
Méridien (plan), 7, 14.

Méridien (premier), 24.
Méridien (principal), 24.
Méridienne, 14.
Mesure du temps, 71.
Métal invar, 76.
Meyer, 90.
Micromètre auto-enregistreur, 139.
Micromètre Gautier, 142.
Micromètre Repsold, 140.
Microscopes micrométriques, 213.
Mire, 153.
Moteur, 72.
Mouchez, 240.
Mouvement diurne, 2, 25.

Nadir, 13, 249.
Newcomb, 62, 79, 81, 163, 211, 236.
Niveau, 146.
Nord, 14.
Nyrén, 210, 211.

Objectif, 35.
Observations méridiennes (principe des), 29.
Observation (procédés d'), 169, 197, 270, 272.
Oculaire, 42.
Oculaire nadiral, 255.
Œrtel, 141.
Œrtling, 238.
Oltramare, 70, 246, 252.
Oom, 244.
Oudemans, 148, 218.
Ouest, 14.

Parallaxe des fils, 68.
Parallèle, 8.
Parallèle de hauteur, 14.
Parleurs, 98.
Passage (détermination de l'heure de), 176, 177.
Passage inférieur, 17.
Passage supérieur, 17.
Perchot, 70, 256, 260.
Périgaud, 242, 244, 245, 292.
Péters, 63.
Phase (correction de la), 280.
Philippot, 210, 255.
Piazzi-Smyth, 148.
Picart, 76.
Pickering, 54.
Piliers, 56.
Plan horizontal, 13.
Plan vertical, 14.
Plummer, 149.
Pogson, 58.
Point équinoxial, 10.
Point oculaire, 43.
Point vernal, 10.
Point (mise au), 67.
Poisson, 262.
Pôles terrestres, 23.
Pôle austral, 4.
Pôle boréal, 4.
Pôle nord, 4.
Pôle sud, 4.
Pond, 216.
Porro, 258.
Porter, 54, 160, 211, 222.
Position directe de la lunette, 161.
Position inverse de la lunette, 161.
Pouillet, 46.
Prisme à réversion, 269.
Prisme redresseur, 269.
Pritchard, 237, 240.
Ptolémée, 2.
Pythagore, 2.

Quart de cercle, 31.

Radau, 140.

Rahts, 142.
Ramsden, 38, 42, 45.
Rebeur-Paschwitz (de), 152, 230.
Rédier, 79, 140.
Réduction au méridien, 284.
Régulateur, 72, 74.
Reid, 73, 74, 75.
Relais, 96.
Renan, 145, 156, 257.
Renou, 266.
Repsold, 61, 140, 206, 210.
Réticule, 48.
Retournement (appareil de), 159.
Riefler, 74, 76, 79, 80.
Ristenpart, 200.
Robert (H.), 75.
Robinson, 79.
Rochon, 46.
Rœmer, 31.

Safarik, 148.
Salet, 70.
Sallet, 114.
Sampson, 109.
Saxton, 85.
Schreiber, 72, 73.
Schwarzschild, 260.
Schwassmann, 200.
Secrétan, 206.
Seguin, 239.
Sens direct, 7.
Sens rétrograde, 7.
Shelton, 74.
Siemens, 97.
Simonin, 158, 244.
Sphère céleste, 2.
Steinheil, 39.
Stéphan, 83, 211.
Stone, 261.
Stroobant, 156.
Struve, 63, 142, 154.
Sud, 14.
Sundell, 41.
Synchronisation, 85.

Taylor, 38, 60.
Tennant, 148, 262.
Thackeray, 203, 265.
Thermomètres (lecture des), 260.
Tisserand, 82, 248.
Tonnelot, 266.
Towne, 40.
Tube de la lunette, 56.
Turner, 149, 165, 262.

Updegraff, 63.

Vérité, 94.
Verschaffel, 103, 112, 113, 114.
Vertical (plan), 14.
Vertical (premier), 14.
Verticale, 7.

Wadsworth, 55.
Warner, 57.
Wheatstone, 96, 140.
Winnecke, 61, 210.
Winnerl, 73, 77, 78, 81, 85.
Wislicenus, 165.
Wolf, 91, 92, 94, 102, 140, 153, 163, 243, 244.
Wolfer, 81.

Young, 103, 107.
Yvon Villarceau, 57, 206, 233, 239, 248, 249, 253, 292.

Zénith, 13.
Zone d'invisibilité, 27.
Zone de perpétuelle apparition, 27.
Zone du lever et du coucher, 27.

TABLE SYSTÉMATIQUE DES MATIÈRES

NOTIONS PRÉLIMINAIRES

1. Mouvement apparent des astres. Sphère céleste. . . . 1
2. Axe du monde. 3
3. Jour sidéral. 5
4. Équateur 5
5. Coordonnées d'observation. 5
6. Coordonnées rapportées à l'axe du monde. Ascension droite et distance polaire. 7
7. Coordonnées rapportées à la verticale. Hauteur et azimut. 13
8. Angle horaire. Coordonnées horaires. 17
9. Relations : 1° entre l'ascension droite $\mathcal{A}$R et l'angle horaire $\mathcal{H}$; 2° entre la distance zénithale méridienne z et la déclinaison $\mathcal{D}$. 20
10. Coordonnées géographiques. Longitudes et latitudes terrestres 22
11. Mouvement diurne apparent à différentes latitudes. . . 25
12. Principe des observations méridiennes. 29

LIVRE I

L'INSTRUMENT DES PASSAGES OU LUNETTE MÉRIDIENNE

CHAPITRE I

LA LUNETTE

13. Lunette méridienne 33
14. Objectif. 35
15. Oculaire. 42

16. Grossissement 45
17. Réticule 48
18. Tubes de la lunette. Axe de rotation. Piliers 56
19. Éclairage du champ et des fils 64
20. Mise au point 67

CHAPITRE II

LA MESURE DU TEMPS

21. L'horloge sidérale 71
22. Le moteur 72
23. L'échappement 73
24. Le régulateur 74
25. Synchronisation électrique des horloges 85
26. Chronomètres 94
27. Relais 96
28. Parleurs 98

CHAPITRE III

L'ENREGISTREMENT DES OBSERVATIONS

29. Chronographes 102
30. Chronographe à cylindre 103
31. Chronographes à bande 104
32. Relevé des bandes 105
33. Chronographe imprimant de Young 107
34. Chronographe imprimant de Hough 109
35. Chronographe imprimant de M. l'abbé Verschaffel . . . 112
36. Chronographe imprimant de M. P. Gautier 114
37. Micromètres auto-enregistreurs 139
38. Micromètre Repsold 140
39. Micromètre Gautier 142

CHAPITRE IV

LES ACCESSOIRES

40. Niveau 146
41. Mire 153

42. Appareil de retournement 159
43. Collimateurs horizontaux 161
44. Collimateur zénithal 166
45. Écran solaire. Besicles à verre teinté 167

CHAPITRE V

LES PROCÉDÉS D'OBSERVATION

46. Différentes méthodes d'observation de l'heure du passage d'un astre sous un fil 169
47. Emploi de plusieurs fils réticulaires 173
48. Fil milieu ou fil moyen 175
49. Observations faites à tous les fils. Détermination de l'heure du passage au fil moyen 176
50. Observations faites à des fils dissymétriques ou à des positions connues du fil mobile. Détermination de l'heure du passage au fil moyen 177
51. Réduction au fil moyen quand l'astre a un mouvement propre 182
52. Réduction au fil moyen quand l'astre est voisin de la Terre 184
53. Distance équatoriale des fils fixes au fil milieu 186
54. Tables de réduction fil à fil 187
55. Réduction au fil moyen d'une série de pointés faits sur une circompolaire 191
56. Procédés d'observation 197

LIVRE II

LE CERCLE MÉRIDIEN

CHAPITRE I

LE CERCLE

57. Disposition des cercles méridiens 205
58. Cercle de calage 206
59. Cercles gradués ou cercles de lecture 209
60. Microscopes micrométriques 213
61. Lecture des microscopes 224

CHAPITRE II

LES ACCESSOIRES

62. Horizons artificiels 229
63. Bain de mercure 231
64. Divers modes de suspension des cuvettes 239
65. Influence de la situation du bain par rapport à la surface du sol 247
66. Influence de la nature du sol, de l'agitation de l'air, des variations de température sur la détermination du nadir 249
67. Installation du bain de mercure 253
68. Oculaire nadiral 255
69. Collimateur zénithal 257
70. Lecture du thermomètre. Aération de la salle 260
71. Lecture du baromètre 265
72. Prisme redresseur ou à réversion 269

CHAPITRE III

L'OBSERVATION DES ASTRES EN DISTANCE POLAIRE DÉCLINAISON OU DISTANCE ZÉNITHALE

73. Mode de pointé 270
74. Mode d'observation des différents astres 272
75. Détermination du bord observable de la Lune en déclinaison 277
76. Correction de la phase 280
77. Réduction au méridien d'une observation de déclinaison faite hors du méridien 284
78. Correction provenant de l'inclinaison du fil dans le cas des observations faites hors du méridien 299

TABLE ALPHABÉTIQUE DES AUTEURS ET DES MATIÈRES 305

33667. — TOURS, IMPRIMERIE MAME.

As
B

Boquet, F.
Les observations méridiennes. Tome 1.

DATE. | NAME OF BORROWER.

UNIVERSITY OF TORONTO
LIBRARY

DO NOT
REMOVE
THE
CARD
FROM
THIS
POCKET